

ÉCOLE DOCTORALE

MECANIQUE, THERMIQUE ET GENIE CIVIL

Année 2006

N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

*Diplôme délivré conjointement par
L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes*

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

MATHIEU RITOU

le 13/12/2006
à l'Ecole Centrale de Nantes

TITRE

SURVEILLANCE D'USINAGE EN FRAISAGE DE PIECES COMPLEXES PAR UN SUIVI DE LA BROCHE

JURY

Président et rapporteur : Henry PARIS, Professeur, Université de Grenoble I

Rapporteur : Olivier CAHUC, Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux I

Examineurs : Bernard ANSELMETTI, Professeur, IUT de Cachan
Benoît FURET, Professeur, IUT de Nantes
Sébastien GARNIER, Maître de Conférences, IUT de Nantes
Jean-Yves HASCOET, Professeur, Ecole Centrale de Nantes
Alain AUFFRET, Directeur Technique, Fischer Precise France

Remerciements

Cette thèse a été réalisée au sein de l'équipe Modélisation et Optimisation de Process de Production (MO2P), de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN), sous la direction de Jean-Yves Hascoët et le co-encadrement de Sébastien Garnier et Benoît Furet. Je voudrais avant tout les remercier vivement de m'avoir accueilli dans leur équipe de recherche et proposé un sujet sur un domaine aussi intéressant que la surveillance d'usinage. Je souhaiterais également exprimer ma gratitude à Jean-François Lafay pour m'avoir ouvert les portes de l'IRCCyN.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement Sébastien Garnier ; pour toute la disponibilité et les conseils dont j'ai pu bénéficier de sa part. Son aide fut précieuse en tout point ; et plus particulièrement pour la démarche scientifique, l'organisation ou les expérimentations menées lors de ces travaux. De plus, j'ai beaucoup apprécié nos conversations, qui ont été fort enrichissantes et motivantes.

J'adresse également mes profonds remerciements à Benoît Furet. Outre sa bonne humeur, sa grande clairvoyance (scientifique) a aiguillé mes recherches au cours de ces trois années. D'où toute ma gratitude à son égard. Par ailleurs, il m'a permis de terminer la thèse dans des conditions idéales.

Un très grand merci également à Jean-Yves Hascoët. Je lui suis extrêmement reconnaissant ; en particulier pour le regard juste, avisé et rigoureux qu'il n'a eu de cesse de porter à mes travaux pendant ces trois années.

Je n'oublierai pas de remercier Mehdi Chérif pour les précieux conseils qu'il m'a donné en début de thèse. Je ferai de même pour l'aide apportée par Grégoire Peigné et Sylvain Laporte ; ainsi que par Sébastien Le-Loch. Afin de mener mes expérimentations, Paul Molina, Marc Sauvaget, Eric Bossard et Jean-Pierre Regoin m'ont également été d'un grand secours.

Je voudrais également exprimer mes remerciements sincères à Henry Paris qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse et d'être rapporteur de ce travail ; à Olivier Cahuc qui a bien voulu rapporter mon mémoire ; ainsi qu'à Bernard Anselmetti et Alain Auffret pour avoir accepté de participer au jury. L'ensemble de leurs avis m'a permis de prendre du recul sur mes travaux.

Enfin, je remercie très chaleureusement ma famille ainsi que mes amis charentais et nantais (qui se reconnaîtront), pour leur soutien ainsi que pour les bons moments passés pendant ces trois ans.

Table des matières

TABLE DES MATIERES	1
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	5
Figures.....	5
Tableaux.....	10
GLOSSAIRE.....	11
INTRODUCTION	13
Plan de l'étude	15
CHAPITRE I : INTRODUCTION A LA SURVEILLANCE AUTOMATIQUE DE L'USINAGE	17
1. Présentation générale de la Surveillance d'Usinage.....	17
1.1. Une nécessité.....	17
1.2. Principe de fonctionnement d'un SSAU	20
1.3. Méthodes de surveillance	21
1.3.1. La surveillance hors-usinage	22
1.3.2. La surveillance pendant l'usinage.....	22
1.4. Principaux objectifs attendus d'un SSAU	23
1.5. Principes d'analyse d'un SSAU	26
2. Instrumentation de la machine outil	30
2.1. Efforts	31
2.1.1. Jauge de contraintes	31
2.1.2. Capteur piézoélectrique	32
2.2. Puissance ou courant	35
2.3. Déplacements	41
2.4. Vibrations.....	43
2.5. Emissions acoustiques.....	44
2.6. Température	44
2.7. Sans ajout de capteurs	45
2.7.1. Informations de la Commande Numérique.....	45
2.7.2. Informations des broches à paliers magnétiques.....	45
2.8. Synthèse	46
3. Méthodes de diagnostic	47
3.1. Approches spécifiques à une pièce.....	48
3.1.1. Apprentissage	48
3.1.2. Méthodes prédictives	48
3.2. Approches génériques	49
3.2.1. Intelligence Artificielle.....	49

3.2.2. Traitement du signal	50
a) Domaine temporel	50
b) Domaine fréquentiel	51
c) Ondelettes	51
3.2.3. Analyse basée sur les caractéristiques du fraisage	52
3.3. Validation expérimentale	53
4. Conclusions et perspectives	54

CHAPITRE II : MISE EN ŒUVRE DE METHODES DE SURVEILLANCE D'USINAGE ISSUES DE LA BIBLIOGRAPHIE..... 55

1. Expérimentations en conditions industrielles	55
1.1. Présentation des critères retenus	55
1.2. Etude analytique.....	60
1.3. Définition d'une pièce test	64
1.4. Expérimentations	67
1.4.1. Protocole.....	67
1.4.2. Traitement des mesures d'effort	68
1.4.3. Traitement des mesures de codeurs d'axes	70
1.5. Implémentation des critères	73
1.5.1. Zone de coupe stable	74
1.5.2. Virage ordinaire	75
1.5.3. Virage avec rebroussement.....	77
1.5.4. Passe de finition	79
1.5.5. Incidents bénins	80
1.5.6. Conclusions préliminaires.....	82
2. Besoins en Surveillance d'Usinage.....	83
2.1. Attentes industrielles.....	83
2.2. L'endommagement d'une dent de l'outil	85
3. Conclusions et perspectives	87

CHAPITRE III : UNE NOUVELLE METHODE : LA SURVEILLANCE D'USINAGE INTERMITTENTE89

1. Principe	90
2. Expérimentations	93
3. Signature de l'outil.....	96
3.1. Effet du battement radial des dents	96
3.2. Effet de l'endommagement d'une dent	98
3.3. Nécessaire et suffisant.....	98
3.4. Conclusions préliminaires	101
4. Estimation du battement radial.....	102
4.1. Etude bibliographique	102
4.2. Proposition d'un nouveau critère	104
5. Premiers résultats	109
5.1. Sensibilité aux conditions de coupe	109
5.2. Détection de bris	110
5.3. Application à la pièce test	114
5.4. Limites actuelles de la méthode	114
5.4.1. Variations intra-échantillon	115
5.4.2. Variations inter-échantillons.....	115
6. Conclusions et perspectives	120

CHAPITRE IV : PERFECTIONNEMENT DE LA METHODE DE SURVEILLANCE D'USINAGE INTERMITTENTE 123

1. Expérimentations	126
2. Définition d'indicateurs de qualité	128
2.1. Pour les estimations de battement radial	128
2.2. Pour les efforts	130
3. Simulation des efforts de coupe	131
3.1. Modèle mécanique d'efforts de coupe	131
3.2. Etalonnage du modèle d'efforts	133
3.3. Validation de l'approche	134
3.4. Fonctions coûts de l'optimisation	135
4. Nouvelle formulation du critère de Surveillance d'Usinage Intermittente.....	136
4.1. Formulation du critère.....	136
4.2. Battement radial simple.....	137
4.3. Limite inférieure du domaine de validité	137
4.4. Limite supérieure du domaine de validité	139
5. Conditionnement et traitement des signaux	140
5.1. Filtrage	140
5.2. Détection des zones d'usinage	140
5.3. Détection des zones de coupe stable	141
5.4. Détection du passage d'une dent.....	141
6. Entité caractéristique à extraire des signaux.....	143
6.1. Valeurs de crête-à-croix	143
6.2. Pics d'effort.....	143
6.3. Quasi moyenne des efforts	143
6.4. Moyenne autour du pic.....	144
6.5. Moyenne dent en prise	144
6.6. Application aux efforts.....	145
7. Correction des estimations	147
7.1. Principe	147
7.2. Que corriger ?.....	147
7.3. Correction par un ratio	149
7.4. Correction par un ajout.....	150
8. Détermination d'une configuration robuste du système de S.U.I.....	151
8.1. Conditionnement et traitement de signaux	151
8.1.1. Robustesse des entités extraites	152
8.1.2. Robustesse des estimations de l'état de l'outil – étape 1	154
8.1.3. Robustesse des estimations de l'état de l'outil – étape 2	156
8.2. Seuils de détection de l'endommagement d'une dent	160
8.3. Validation des améliorations apportées à la méthode de S.U.I.	162
9. Conclusions et perspectives	166

CHAPITRE V : APPLICATION ET INTEGRATIONS DANS UN SYSTEME DE SURVEILLANCE D'USINAGE 169

1. Mise en place de la Surveillance d'Usinage Intelligente	170
1.1. Préparation de la Surveillance d'Usinage Intelligente	170
1.1.1. Etalonnage	170
1.1.2. Analyse du programme ISO	173

1.1.3. Simulations numériques.....	173
1.2. Surveillance d'Usinage Intelligente au cours de l'usinage.....	174
1.3. Inspection de l'outil hors-usinage	178
2. Phénomène d'usure.....	180
3. Choix du capteur.....	183
3.1. Puissance consommée par la broche	184
3.2. Capteurs inductifs.....	185
3.2.1. Etude de faisabilité	186
3.2.2. Etalonnage	187
3.2.3. Surveillance d'Usinage Intelligente.....	189
4. Conclusions et perspectives	190
<i>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</i>	<i>191</i>
1. Conclusions.....	191
2. Perspectives.....	194
2.1. Suivi de faibles endommagements de l'outil.....	194
2.2. Suivi des vibrations.....	195
2.3. Suivi de l'usure	195
2.4. Suivi de la broche.....	196
2.5. Inspection hors-usinage de l'outil	196
2.6. Suivi du processus de fabrication.....	196
<i>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i>	<i>199</i>
<i>ANNEXES DU CHAPITRE IV : PRECISIONS ET JUSTIFICATIONS APORTEES QUANT A LA METHODE DE SURVEILLANCE D'USINAGE INTERMITTENTE.....</i>	<i>205</i>
1. Etalonnage du modèle d'efforts	205
1.1. Choix des passes d'étalonnage.....	205
1.2. Algorithme de l'étalonnage.....	207
2. Validation de l'approche	209
2.1. Au niveau des efforts	209
2.2. Au niveau du battement radial	211
3. Fonctions coûts de l'optimisation	213
4. Conditionnement et traitement des signaux	214
4.1. Intervention en amont du process.....	214
4.2. Echantillonnage.....	215
4.3. Filtrage	216
4.4. Ajustage des mesures	216
4.5. Détection des zones d'usinage	218
4.6. Détection des zones de coupe stable	218
4.7. Détection du passage d'une dent.....	219
4.7.1. De proche en proche	219
4.7.2. A période constante	220
4.7.3. A partir de la position angulaire de la broche	222
<i>ANNEXES DU CHAPITRE V : DEROULEMENT DE L'ECAILLAGE DE LA DENT N°3.....</i>	<i>225</i>

Table des illustrations

Figures

Figure 1. Exemple d'incident de coupe en fraisage [Fur05].....	18
Figure 2. Principe de fonctionnement des SSAU.	20
Figure 3. Principe de fonctionnement des SSAU.	21
Figure 4. Détection de bris de foret hors usinage : par un jet de lubrifiant. (Hydro Distance Sensor HDS de Nordmann).....	22
Figure 5. Différents types de seuils : fixe à gauche, courbes enveloppes à droite [Klu03].	26
Figure 6. Problématique du positionnement des niveaux des seuils.	27
Figure 7. Principe d'analyse de l'usure.....	28
Figure 8. Possibilité d'implantation de capteurs sur CU.	30
Figure 9. Exemple de jauge industrielle (Jauge de contrainte Brankamp).....	32
Figure 10. Capteur piézoélectrique [Klu03].....	32
Figure 11. Bague d'effort [Kis00].	34
Figure 12. Capteur à effet Hall [Klu03].	35
Figure 13. Linéarité de la puissance par rapport au couple [Art02].	36
Figure 14. Sources de perturbation des signaux de puissance [Ket01].	37
Figure 15. Composantes fréquentielles du courant [Rom03].	37
Figure 16. Phénomène de lissage du signal de courant [Lee95] (Fréquence de passage des dents : 18 Hz ; bande passante du servomoteur : 62 Hz).....	38
Figure 17. Courbe du diamètre de foret minimal pouvant être surveillé [Nor03].	39
Figure 18. Retard du signal provenant de la broche [Kim01].	39
Figure 19. Bague 3SA [Pro03].	41
Figure 20. Bague SpiCoM (Fag).	41
Figure 21. Capteurs inductifs placés à proximité des paliers magnétiques [Mul02].	42
Figure 22. Capteur de vibrations 3D, Kistler.	43
Figure 23. Sonde de température intégrée à la plaquette et ses mesures pendant un essai de coupe, ACTARUS. ...	44
Figure 24. Principe de fonctionnement de l'asservissement de la position des broches à paliers magnétiques (S2M).	45
Figure 25. Les différentes approches possibles de la surveillance d'usinage [Rit06a].	47
Figure 26. Analyse dans le domaine fréquentiel [Chen99].	51
Figure 27. Efforts de coupe, lors d'une phase d'entrée en matière de l'outil (2 dents).....	52
Figure 28. Différentes valeurs extraites des efforts de coupe au passage d'une dent.	58
Figure 29. Simulations d'efforts de coupe et du TFI [Kim01].	60
Figure 30. Epaisseur de copeaux et efforts de coupe, en fraisage.	61
Figure 31. Résultante des efforts, simulée en considérant le battement radial (outil à 4 dents).	61

Figure 32. Exemples de pièces tests ([Ter05] à gauche, [Dug02] à droite).....	64
Figure 33. Pièce test de Kim et Chu [Kim01].....	65
Figure 34. Stratégies d'usinage pour l'évidement de poches [Has06].....	65
Figure 35. Variations présumées de l'engagement radial et de l'avance, lors d'un changement de direction de 90°.....	66
Figure 36. Pièce test et trajectoires.	67
Figure 37. Table dynamométrique, montée entre la pièce et la table de la fraiseuse.....	68
Figure 38. Résultante des efforts de coupe, calculée à partir d'efforts filtrés ou non.	68
Figure 39. Recherche de la vitesse de broche réelle à partir d'une FFT.	69
Figure 40. Recherche de proche en proche des extremums des efforts pour chaque passage de dent.	69
Figure 41. Divergence de l'algorithme de recherche de proche en proche [Dey95].	70
Figure 42. Erreur de suivi de trajectoire (les valeurs sont en millimètres).	71
Figure 43. Vitesse d'avance instantanée lors de l'usinage de la pièce. (outil Ø20 à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$).....	71
Figure 44. Calcul itératif de l'engagement radial instantané.....	72
Figure 45. Engagement radial instantané lors de l'usinage de la pièce. (outil Ø20 à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$).....	73
Figure 46. Comportement des critères lors de virages ordinaires. (outil Ø20 à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$).....	74
Figure 47. Courbes en dents de scie dues à une représentation en fonction du temps uniquement, et non dent par dent [Dey95] [Kim01].	75
Figure 48. Variations de l'engagement radial lors du franchissement d'un virage ordinaire (établies à partir des mesures de codeurs d'axe).....	76
Figure 49. Comportement des critères lors de changements de direction avec rebroussement. (outil Ø20 à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$).....	78
Figure 50. Comportement des critères lors de finition du coin situé au fond à droite de la poche. (outil Ø20 à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 0,5$ mm).....	79
Figure 51. Recyclage de copeau lors d'une passe de finition rectiligne. (outil à 2 plaquettes, $f_z = 0,08$ mm/dent, $a_e = 0,5$ mm).....	80
Figure 52. Comportement du critère TFI en cas d'incidents bénins tel qu'un recyclage de copeau, survenant lors de changements de conditions de coupe. (outil à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 4,8$ m/min, $a_e = 0,5$ mm).....	81
Figure 53. Détections abusives des critères [Dey95][Kim01] lors de l'usinage d'un niveau de la poche.....	82
Figure 54. Dispositif expérimental.	94
Figure 55. Mesure du battement radial des dents, sur l'outil monté en broche et avec une touche micrométrique. ..	97
Figure 56. Signature sur les efforts de coupe, d'un outil neuf (due au battement radial des dents, à gauche) puis du même outil endommagé (à droite). (essais B, outil à 4 plaquettes, engagement radial 10 % ϕ_{outil} , avance 0.12 mm/dent).....	97
Figure 57. Efforts moyens et maxis sur une passe rectiligne.	99
Figure 58. Comparaison des efforts moyens mesurés sur des passes avec outil neuf ou endommagé.....	100
Figure 59. Comparaison des efforts maxis mesurés sur des passes avec outil neuf ou endommagé.	100
Figure 60. Estimations de battements radiaux, en fonction de l'engagement radial, par [See99].....	103
Figure 61. Extraction de l'entité caractéristique « pic d'efforts » à chaque passage de dent, pour un jeu donné de conditions de coupe.....	104
Figure 62. Pics d'effort généré au passage de chaque dent de l'outil, en fonction de l'avance et de l'engagement radial (outil à 2 dents, essais A).....	105
Figure 63. Epaisseur de copeau enlevée en fonction du battement radial relatif.....	106

Figure 64. Pics d'efforts, fonction affine de l'épaisseur de copeau.....	107
Figure 65. Relation entre le battement radial relatif et les pics d'efforts.	108
Figure 66. Estimations moyennes de battement radial relatif pour une large gamme de conditions de coupe.	109
Figure 67. Estimations moyennes de battement radial relatif, outil neuf à gauche et avec une dent brisée à droite (pour une large gamme de conditions de coupe).	111
Figure 68. Comparaison des estimations moyennes de battement radial relatif par rapport aux seuils de détection de bris, avec un outil neuf.	112
Figure 69. Comparaison des estimations moyennes de battement radial relatif par rapport aux seuils de détection de bris, avec un outil partiellement endommagé.....	113
Figure 70. Surveillance d'Usinage Intermittente de la pièce test.	114
Figure 71. Manque de robustesse de l'entité caractéristique « pic d'effort ». (essais A, outil à 3 dents, $a_e=100\%$, $f_z=0,2$ mm/dent).....	115
Figure 72. Estimations du battement radial relatif des dents, sur l'ensemble du domaine de conditions de coupe testé (fraise Ø32 mm à 2 plaquettes, essais B).....	116
Figure 73. Estimations du battement radial relatif des dents, sur l'ensemble du domaine testé. (fraise monobloc Ø20 mm à 3 dents, essais B).....	117
Figure 74. Estimations du battement radial relatif des dents sur l'ensemble du domaine testé. (fraise Ø 25 mm à 4 plaquettes, essais B).....	118
Figure 75. Modification de la signature de l'outil sur la résultante des efforts de coupe, lorsque plusieurs dents sont engagées simultanément (4 dents, a_e 100%, f_z 0,2 mm/dent).	119
Figure 76. Compensation des variations des estimations, grâce à des simulations numériques.	123
Figure 77. Schémas de principe de la méthode de SUI.....	124
Figure 78. Diagramme représentant les étapes de la phase de préparation de la SUI (avant l'usinage).	125
Figure 79. Diagramme représentant les différents éléments de la méthode de SUI (pendant l'usinage).	125
Figure 80. Histogramme de distribution des estimations de battement radial (après correction).	128
Figure 81. Nuance entre l'écart-type et le rapport S/N, lorsque que l'objectif est à minimiser.	131
Figure 82. Schématisation des efforts de coupe.....	132
Figure 83. Comparaison du battement radial estimé à partir de signaux d'efforts expérimentaux et simulés. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c]).....	134
Figure 84. Non-linéarité des efforts de coupe [Rit06c].	136
Figure 85. Chevauchement du travail des dents et son effet sur la résultante des efforts de coupe (simulation pour un outil à 5 dents).	139
Figure 86. Détection des zones de coupe stable.	141
Figure 87. Déphasage des pics d'efforts dû à la direction d'avance.....	142
Figure 88. Evolution des efforts tour de broche après tour de broche, après correction de la direction d'avance.	142
Figure 89. Extraction de l'entité « moyenne autour du pic » au passage d'une dent.	144
Figure 90. Calcul de l'entité « moyenne dent en prise » pour la dent N°2 et un seuil réglé à 50% ($a_e=76\%$ à gauche, 100% à droite).	145
Figure 91. Comparaison des différentes entités caractéristiques, extraites à la fois de signaux expérimentaux et simulés (pour les conditions de coupe de la série d'essais C, avec l'outil à 2 dents ayant un battement radial important, filtrage à 2.f.).....	146
Figure 92. Effet moyen de l'engagement radial (à gauche) et de l'avance (à droite) sur les estimations de battement radial relatif (essais C avec l'outil à 2 dents).	148
Figure 93. Effet de la correction par ratio sur la variance des estimations.	150
Figure 94. Comparaison des histogrammes représentant les estimations d'un faible battement radial, après une correction par ratio ou bien par ajout (large gamme de conditions de coupe).	150

Figure 95. Robustesse de la correction par ratio (en distinguant l'ordre de grandeur du battement sur les miniatures).....	155
Figure 96. Robustesse de la correction par ajout, prenant en compte l'effet de l'avance.....	155
Figure 97. Robustesse de la correction par ajout, ne prenant pas en compte l'effet de l'avance.....	156
Figure 98. Effet moyen sur la robustesse.....	158
Figure 99. Problème des détections de bris quand plusieurs dents sont engagées simultanément.....	159
Figure 100. Risque de déphasage entre les efforts expérimentaux et simulés, selon l'estimation de la fréquence réelle de rotation de la broche.....	159
Figure 101. Carte de contrôle des estimations de l'état de l'outil.....	161
Figure 102. Signatures des efforts mesurés et simulés des 4 passes d'étalonnage.....	163
Figure 103. Estimations de battement radial, outil possédant 5 plaquettes neuves.....	164
Figure 104. Endommagement de la dent N°5.....	164
Figure 105. Signature de l'outil avant et après l'endommagement de la dent N°5, pour 3 engagements radiaux différents ($f_z = 0,22$ mm/dent et $a_e = 7, 69$ et 100% de gauche à droite).....	165
Figure 106. Estimations de battement radial, outil possédant 5 plaquettes dont une endommagée.....	165
Figure 107. Application de la SUI (après perfectionnement) à la pièce test.....	166
Figure 108. Dispositif expérimental.....	171
Figure 109. Système d'inspection des outils hors-usinage.....	172
Figure 110. Reconstruction géométrique en 3D de l'outil, après inspection.....	172
Figure 111. Battement radial obtenu par l'inspection de l'outil.....	173
Figure 112. Insert placé sur la trajectoire de l'outil afin de provoquer un bris (entre c et d).....	174
Figure 113. Evolution de la signature de l'outil sur les efforts au cours de l'usinage.....	175
Figure 114. Entités « moyenne dent en prise » calculées au cours de l'usinage.....	175
Figure 115. Evolution des estimations de battement radial relatif, au cours de l'usinage.....	176
Figure 116. Carte de contrôle de l'état de l'outil, au cours de l'usinage.....	177
Figure 117. Comparaison de l'outil avant et après usinage.....	178
Figure 118. Confirmation visuelle de l'écaillage de la dent N°3.....	178
Figure 119. Comparaison des battements radiaux avant et après l'incident.....	179
Figure 120. Constatation de l'endommagement de la dent N°3 par les variations du battement radial simple.....	179
Figure 121. Evolution du niveau d'usure en V_b mesuré sur les 3 dents, au cours des essais.....	181
Figure 122. Effets moyens de l'avance et de l'usure sur les signaux d'efforts moyens et de puissance.....	181
Figure 123. Entités extraites des signaux.....	182
Figure 124. Estimations du battement radial des dents en fonction de l'usure.....	183
Figure 125. Transformée de Fourier de signaux de puissance de broche (rainurage avec un outil à 5 dents).....	184
Figure 126. Puissance moyenne consommée par la broche en fonction de l'avance et de l'engagement radial (outil à 5 dents neuf puis endommagé).....	185
Figure 127. Intégration des capteurs inductifs dans l'outil de production.....	186
Figure 128. Signatures des inductifs au cours de l'usinage de la pièce.....	187
Figure 129. Etalonnage des capteurs inductifs.....	188
Figure 130. Comparaison des signatures de l'outil sur les 4 passes d'étalonnage ; efforts en pointillés et inductifs en trait fort.....	188
Figure 131. Carte de contrôle de l'état de l'outil, établie à partir des signaux des inductifs.....	189
Figure 132. Suivi du processus de fabrication.....	194

Figure 133. Réalisation de passes d'étalonnage, avant toute surveillance d'usinage.....	206
Figure 134. Localisation des 4 passes d'étalonnage.	206
Figure 135. Extraction de l'entité caractéristique « moyenne autour du pic » au passage d'une dent.....	209
Figure 136. Entité caractéristique extraite des signaux simulés sur une large gamme de conditions de coupe. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c]).....	210
Figure 137. Comparaison des entités caractéristiques obtenues à partir des signaux expérimentaux et simulés. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c]).....	211
Figure 138. Estimation du battement radial de la dent 2, à partir des entités extraites de signaux simulés sur une large gamme de conditions de coupe. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c])	212
Figure 139. Comparaison du battement radial de la dent 2, estimé à partir de signaux expérimentaux et simulés. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c]).....	212
Figure 140. Comparaison des F_j , entre signaux expérimentaux et signaux simulés ; lorsque l'optimisation de l'étalonnage utilise la fonction coût W_b (équation 43).....	213
Figure 141. Réponses en fréquence (FRF, en Hz) résultant du sonnage de la table dynamométrique (à gauche) et de l'outil à 2 dents monté en broche (à droite), lors de la série d'essais B.....	215
Figure 142. Résultante des efforts de coupe lors de l'usinage de 21 passes rectilignes et observation d'une dérive des niveaux d'efforts à vide pour une acquisition sur environ 5 min.....	217
Figure 143. Dérive des efforts en X et Y (pendant 5 min environ) devant être compensée.....	217
Figure 144. Détection des zones de coupe stable.	219
Figure 145. Extraction des pics d'effort de proche en proche (outil à 3 dents, $f_z=0,2$ mm/dent, $a_e=100\%$).	220
Figure 146. Extraction des pics d'effort à période constante.	221
Figure 147. Déphasage des pics d'efforts dû à la direction d'avance.....	222
Figure 148. Efforts simulés pour un rainurage avec outil à 5 dents.....	222
Figure 149. Affinage de l'estimation de la fréquence de passage des dents.....	223
Figure 150. Evolution des efforts tour de broche après tour de broche, après correction de la direction d'avance.	224
Figure 151. Configuration de l'usinage.....	225
Figure 152. Passe rectiligne et stable avant le trou.....	226
Figure 153. Première moitié du franchissement du trou.	226
Figure 154. L'insert ?	227
Figure 155. L'insert.	227
Figure 156. Constatation de l'écaillage.	228
Figure 157. Confirmation de l'écaillage.....	228
Figure 158. Seconde moitié du franchissement du trou.	229
Figure 159. Passe rectiligne et stable, après le trou.....	229

Tableaux

<i>Tableau 1. Synthèse des propriétés des critères de Surveillance d'Usinage qui intègrent les caractéristiques du fraisage.</i>	56
<i>Tableau 2. Paramètres opératoires des expérimentations.</i>	67
<i>Tableau 3. Données du plan complet des expérimentations A.</i>	94
<i>Tableau 4. Données du plan complet des expérimentations B.</i>	95
<i>Tableau 5. Positions théoriques de l'outil.</i>	106
<i>Tableau 6. Positions réelles des dents.</i>	106
<i>Tableau 7. Epaisseur réellement enlevée par chaque dent.</i>	106
<i>Tableau 8. Données du plan complet des expérimentations C avec l'outil à 2 dents (réalisé une fois avec un battement radial faible entre les dents et une fois avec un battement important).</i>	126
<i>Tableau 9. Données du plan complet des expérimentations C avec l'outil à 3 dents.</i>	126
<i>Tableau 10. Données du plan complet des expérimentations D avec l'outil à 5 dents.</i>	127
<i>Tableau 11. Conditions de coupe des passes d'étalonnage.</i>	133
<i>Tableau 12. Robustesse de l'entité extraite des signaux d'effort en fonction du conditionnement des signaux, au travers du rapport Signal/Bruit S/N_F.</i>	153
<i>Tableau 13. Rapport S/N_e moyen en filtrant à $1 \frac{1}{2} f_c$.</i>	157
<i>Tableau 14. Ecart-types des populations d'estimations de battement radial.</i>	162
<i>Tableau 15. Paramètres opératoires des passes d'étalonnage.</i>	171
<i>Tableau 16. Paramètres opératoires des essais d'usure, réalisés par Garnier [Gar00].</i>	180
<i>Tableau 17. Conditions de coupe des passes d'étalonnage.</i>	207

Glossaire

Données relatives aux conditions de coupe :

a_e	engagement radial de l'outil (% du diamètre de l'outil)
a_p	engagement axial de l'outil (mm)
f_z	avance à la dent (mm/dent/tr)
f_c	fréquence de passage des dents (Hz)
T_c	période de passage des dents (s)
φ	position angulaire de l'outil (°)
φ_e	angle d'entrée en matière des dents de l'outil (°)
φ_s	angle de sortie matière des dents de l'outil (°)
$h_c(\varphi)$	épaisseur nominale de copeau instantanée ($h_c(\varphi) = f_z \cdot \sin \varphi$, en mm)
h_c	épaisseur nominale de copeau maximale ($h_c = f_z \cdot \max\{\sin \varphi\}$, en mm)
j	indice d'une dent de l'outil
Z	nombre de dents de l'outil

Données relatives aux efforts de coupe :

$F(\varphi)$	résultante des efforts instantanée (N)
$\overline{F}(n)$	moyenne de la résultante des efforts sur un tour de broche (N)
$F_t(\varphi)$	effort tangentiel instantané (N)
$F_r(\varphi)$	effort radial instantané (N)
K_c, K_e	constantes du modèle d'effort affine
k_t, k_r, p	constantes du modèle d'effort non-linéaire
$\varepsilon_{j \text{ sim}}$	battement radial simple de la dent j , associé au modèle d'effort non-linéaire (μm)

Données relatives aux estimations de battement radial :

n	indice du tour de broche
$\varepsilon_j(n)$	battement radial simple de la dent j (calculé par rapport à la dent N°1, en μm)
$\Delta\varepsilon_j(n)$	battement radial relatif de la dent j ($\Delta\varepsilon_j = \varepsilon_j - \varepsilon_{j-1}$, en μm)
$F_j(n)$	entité caractéristique (pic, crête à creux, moyennes ...) extraite de la résultante des efforts de coupe à un passage d'une dent j (N)
$\overline{F_j}(n)$	moyenne des entités caractéristiques F_j extraites sur un tour de broche (N)
$PV_j(n)$	valeur de crête à creux extraite de la résultante des efforts de coupe à un passage de la dent j (N)
σ_ε^{pop}	écart-type de la population des estimations de battement radial (μm)
$\sigma_\varepsilon^{étalon}$	écart-type de la population des estimations de battement radial réalisées à partir des passes d'étalonnage (μm)
S/N_ε	rapport signal sur bruit relatif aux estimations de battement radial (dB)
S/N_F	rapport signal sur bruit relatif aux simulations d'effort (dB)
λ	variable d'ajustement de la fonction coût des boucles d'optimisation de l'étalonnage (éq. 44, p. 135)

Acronymes :

Bm	<i>relative eccentricity rate</i> , critère de Deyuan et al. [Dey95]
Km	<i>peak rate</i> , critère de Deyuan et al. [Dey95]
TFI	<i>Tool Failure Index</i> , critère de Kim et Chu [Kim01]
SSAU	Système de Surveillance Automatique de l'Usinage
SUI	Surveillance d'Usinage Intermittente, méthode proposée par Ritou, Garnier, Furet et Hascoët [Rit06a]
SUIMO	Surveillance d'Usinage Intelligente et Mesure d'Outil, proposé par Ritou, Garnier, Furet et Hascoët

Introduction

Dans notre société de consommation, la demande pour des produits innovants, de qualité, bons marchés et de plus en plus personnalisés, s'accroît sans cesse. Ainsi, depuis l'après guerre, nous sommes passé de la production de masse à la production flexible, afin de fournir une plus grande variété de produits, à des coûts moindres. Dans certains secteurs aujourd'hui, la production est même devenue personnalisée (*customized production*). Par exemple, aujourd'hui, chez un fabricant français de voitures, la ligne produisant trois modèles différents, à hauteur d'environ 1500 véhicules par jour, le record de voitures parfaitement identiques sur une journée ne dépasse pas trois. Le volume des séries et le cycle de vie des produits ont ainsi chuté et, pour suivre l'évolution du marché, les systèmes de productions ont dû s'adapter.

En outre, la faiblesse des coûts de transport au regard des écarts des coûts de production, a favorisé la mondialisation des échanges en biens manufacturés entre pays riches et nouveaux pays industrialisés. L'échange de ces produits représente aujourd'hui 80% du commerce mondial. L'émergence de ces pays, nommés « low-cost », a ainsi créé une division internationale du travail. La production de produits à faible valeur ajoutée y a été délocalisée. La fabrication de produits technologiques, à forte valeur ajoutée et nécessitant de hautes qualifications, était jusqu'à présent maintenue dans les pays les plus industrialisés.

Dans ce contexte très concurrentiel, tous les secteurs d'activités des entreprises se doivent d'assurer en permanence l'optimisation du triptyque Qualité-Coûts-Délais. Le secteur de la production qui regroupe les différents acteurs de la préparation de la production, de la CFAO, de l'organisation et de la logistique de la production, de la fabrication, du contrôle et de la qualité, du management des ressources, de la maintenance, ... forme à lui seul un secteur extrêmement stratégique de ce triptyque, et ce, quel qu'en soit le domaine et le type de production. En France, s'il est un secteur dont le pourcentage du PIB reste toujours aussi important et qui concerne encore un nombre d'emplois induits directement ou indirectement très élevé, c'est bien la production par enlèvement de matière, communément appelée : l'usinage.

Il s'agit là notamment des secteurs de l'aéronautique et de l'automobile, ce qui inclut la fabrication des outillages (moules et matrices). Certains nouveaux pays industrialisés ont rattrapé leur retard et deviennent également concurrentiels sur ce segment des pièces à forte valeur ajoutée, qui relève de la production flexible voire unitaire. Ainsi, moulistes et forgerons tendent à effectuer davantage d'activités de service et délocalisent une partie de leur production vers l'Europe de l'Est, l'Iran ou l'Asie du Sud-Est.

C'est pourquoi des avancées technologiques doivent sans cesse être réalisées pour que nos systèmes de production restent compétitifs et que les emplois soient préservés. Ce fut par exemple le cas avec le passage à l'UGV (Usinage à Grandes Vitesses) au cours duquel les techniques, les technologies, les stratégies ont très largement évolué : de nouveaux systèmes FAO, outils de simulation, machines, broches, contrôleurs, outils, ... ont été développés. Les pièces sont désormais usinées très rapidement, avec une précision toujours croissante et dans des classes de matériaux où cela n'était pas possible auparavant. Les objectifs de coût, de qualité et de production sont notamment atteints par un plus haut degré d'automatisation des systèmes de production et une moindre assistance humaine.

Malgré ces avancées technologiques et tout le soin pouvant être apporté à la préparation de l'usinage, des incidents peuvent toujours survenir lors de l'usinage (bris de plaquette, usure prématurée, vibrations, ...). Or, la surveillance de l'usinage effectuée par l'opérateur, depuis l'extérieur de la machine, est fortement gênée par la lubrification, les copeaux, les vitesses d'avance élevées et le bruit des autres machines de l'atelier. De plus, s'il parvient à détecter l'incident, son temps de réaction n'est pas assez rapide vis à vis des vitesses élevées utilisées sur les machines UGV. Cela peut conduire à des catastrophes très coûteuses.

Pour sécuriser le processus de fabrication, garantir la qualité des pièces et atteindre une pleine productivité, des Systèmes de Surveillance Automatiques de l'Usinage (SSAU) sont plus que jamais nécessaires. Cependant, si des solutions industrielles sont proposées pour suivre les systèmes de production de masse, il n'existe pas actuellement de SSAU fiables et efficaces pour les systèmes de production flexible en fraisage (qui fabriquent notamment les pièces à forte valeur ajoutée en unitaire ou cadencements faibles). Ce secteur étant stratégique, la demande industrielle est forte.

L'objectif des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit, sera donc de répondre à ce besoin en proposant une solution efficace et fiable de Surveillance Automatique de l'Usinage pour la production flexible par fraisage.

Plan de l'étude

Afin de présenter l'ensemble des travaux menés pour atteindre les objectifs fixés pour cette thèse, nous suivrons le cheminement suivant :

Le premier chapitre présentera le principe de fonctionnement des SSAU commerciaux et nous verrons qu'ils ne sont pas compatibles avec les systèmes de production flexible. L'étude bibliographique des productions scientifiques nous montrera qu'il est intéressant d'analyser les actions mécaniques durant l'usinage pour suivre l'endommagement des outils. Elle nous permettra de choisir plusieurs critères de surveillance d'usinage particulièrement adaptés aux différentes configurations d'usinage pouvant être rencontrées lors de production flexible en fraisage.

Pour valider expérimentalement ces critères, nous les testerons dans des conditions de coupe et de trajectoires industrielles, lors du second chapitre. Les limites de ces critères seront alors identifiées : de nombreuses détections abusives sont déclenchées lorsque les efforts varient à cause de changements de conditions de coupe. Cette étude nous permettra de mieux caractériser les besoins des SSAU pour les productions flexibles.

Au troisième chapitre, nous proposerons une nouvelle approche : la Surveillance d'Usinage Intermittente. Pour palier le problème de fiabilité des précédents critères, nous suivrons l'historique de l'état de l'outil seulement sur les zones où la coupe est stable. Un nouveau critère conçu par un couplage de la mesure d'efforts à un modèle d'efforts de coupe, sera proposé. Il caractérisera l'état de l'outil par une estimation du battement radial de ses dents. Des expérimentations valideront l'approche, par des détections fiables de bris de plaquette. Néanmoins, nous constaterons quelques limites, telle que certaines variations des estimations de l'état de l'outil, qui nuisent à la précision des détections, à la fin de cette première étape du développement de notre méthode de SUI.

Lors de la seconde étape du développement de notre méthode, nous verrons au quatrième chapitre que ces variations des estimations de l'état de l'outil, peuvent être compensées pendant l'usinage, grâce à des simulations numériques effectuées au préalable. La précision, la robustesse

et le domaine de validité de la méthode seront améliorés ; notamment grâce à un meilleur conditionnement des signaux et en extrayant de ces signaux d'efforts, une information plus pertinente. De nouvelles expérimentations valideront les améliorations proposées.

Enfin, au chapitre 5, nous montrerons que notre méthode permet de détecter un faible endommagement de l'outil, survenant au cours de l'usinage d'une pièce. Nous proposerons de coupler notre SSAU à un système d'inspection des outils hors-usinage qui confirmera ses détections. Nous étudierons ensuite si notre méthode est perturbée ou non par l'usure des outils. Pour l'appliquer dans un cadre industriel, nous proposerons alors une alternative innovante à l'utilisation d'une table dynamométrique. Il s'agit d'instrumenter la broche par des capteurs inductifs et d'effectuer la mesure d'efforts au travers des déformations de l'ensemble tournant {rotor de broche, porte-outil, outil}. Au cours de nos expérimentations, les capteurs inductifs s'avèreront être une solution d'avenir.

Nous aurons ainsi défini et validé un système de Surveillance d'Usinage permettant de détecter de faibles endommagements de l'outil, lors de productions à faible cadencement par fraisage.

Chapitre I : Introduction à la surveillance automatique de l'usinage

La première partie de ce chapitre est une présentation générale de la surveillance d'usinage. Nous justifierons l'exploitation de systèmes de surveillance automatique d'usinage et préciserons les attentes industrielles. Nous détaillerons ensuite les spécifications de ces systèmes de surveillance en termes de méthodes, de principes de fonctionnement et d'analyse.

Nous traiterons alors du premier point fondamental de la surveillance d'usinage, qui est l'instrumentation des machines-outil. L'objectif est de fournir une information précise et robuste, permettant de comprendre ce qui se passe pendant l'usinage d'une pièce. Les différentes technologies de capteurs seront présentées et leurs principaux avantages et inconvénients respectifs seront mis en avant.

Nous aborderons enfin le second point fondamental de la surveillance d'usinage, qui est le traitement et l'analyse de ces informations (acquises grâce à l'instrumentation de la machine). L'objectif est alors de déterminer avec fiabilité si l'usinage se déroule correctement ou si un incident est survenu. Parmi les différentes méthodes proposées dans la littérature, nous identifierons les méthodes les plus aptes à surveiller l'usinage de petits lots de pièces complexes.

1. Présentation générale de la Surveillance d'Usinage

1.1. Une nécessité

Pour un système à événements discrets tel qu'une chaîne de conditionnement de flacons, la qualité de la production va être assurée par la partie commande. Elle ne permettra la réalisation d'une tâche que si la précédente a été effectuée correctement. Elle utilise alors différents capteurs et détecteurs pour élaborer l'information permettant de valider l'exécution de la tâche précédente.

Pour un système de production par enlèvement de matière, en usinage sur Machine-Outil à Commande Numérique (MOCN), il en va différemment. Seules les tâches séquentielles, telles que les changements d'outils ou de palettes, sont sécurisées. Il est demandé à la CN d'usiner une trajectoire selon un parcours donné. La CN va alors s'attacher à déplacer les axes de la machine pour respecter, au mieux, les consignes de déplacements et de vitesse, relatives à la trajectoire et ce conformément à ce qui a été demandé à la CN via le code ISO. Actuellement, la machine n'est pas capable de déterminer si l'enlèvement de matière s'est correctement déroulé au cours de l'usinage de la pièce. Si l'outil est endommagé, l'usinage va tout de même continuer ; au risque de détériorer la pièce mais également la broche et d'autres éléments de la machine. C'est pourquoi il est nécessaire de surveiller le bon déroulement de l'usinage.

Malgré toute l'attention pouvant être apportée à la préparation de la production en UGV (lors de la génération de trajectoires, du choix des paramètres opératoires, ainsi que du choix et de la préparation des outils), nous pourrions imaginer que l'usinage se déroule sans incident. Ce n'est pourtant pas le cas et de nombreux incidents se produisent. Comme par exemple une usure prématurée de plaquette qui engendre des échauffements énormes au niveau des copeaux tel que l'illustre la Figure 1 ci-dessous.



Figure 1. Exemple d'incident de coupe en fraisage [Fur05].

Outre les problèmes de suivi de trajectoires, des problèmes liés à la coupe peuvent apparaître lors de la réalisation d'une passe d'usinage. Ces incidents sont de différentes natures. Si les trajectoires n'ont pas été correctement générées, une collision de l'outil peut avoir lieu. Une action doit alors être menée le plus rapidement possible afin de limiter, notamment, l'endommagement de la broche. Dans le cas d'une production stabilisée, une usure excessive, un écaillage ou un bris accidentel de plaquette peut être observé avant le changement d'outils prédéterminé. La qualité de la pièce usinée n'est alors plus assurée malgré des trajectoires correctes et la capacité du process est affectée [Pri99]. Le bris ou la collision sont très dangereux en

tournage car l'énergie cinétique de la pièce en rotation peut la faire sortir des mors. Une surcharge de l'outil doit également être détectée car cela implique une modification des conditions de coupe et peut entraîner un endommagement de l'outil. Un broutement peut également apparaître. Il va engendrer des ondulations sur la surface usinée, dégradant ainsi sa qualité, et va dangereusement solliciter la broche et d'autres éléments de la machine. De plus, il génère cycliquement une surcharge sur l'arête de l'outil pouvant mener plus rapidement à sa ruine. Il est également préférable de détecter, soit une absence de l'outil ou de la pièce, soit un bridage défectueux, ou encore un bourrage de copeau ou bien un dysfonctionnement de la machine. Si un incident apparaît, une action adéquate doit être menée rapidement pour limiter les dégâts et par conséquent les surcoûts engendrés.

Traditionnellement, la surveillance d'usinage est dévolue à un opérateur dont le rôle est de s'assurer du bon déroulement du process et de réagir en cas de problème en mettant fin à l'usinage en cours ou en ajustant quelques paramètres opératoires, par exemple [Fur94].

Cependant, les capacités sensorielles de l'opérateur deviennent souvent insuffisantes. L'observation visuelle peut être perturbée par la lubrification et l'ouïe par les autres machines de l'atelier. Pour ce qui est du temps de réaction, lors d'une opération d'usinage à la vitesse d'avance de 10 m/min si l'on situe le temps de réaction de l'opérateur entre 1/2 s et 2 s, la même machine se s'arrêtera qu'après une course de 90 à 300 mm. Les dommages pour la machine peuvent être considérables. Par ailleurs, si un opérateur peut détecter un incident brusque, il lui est difficile de détecter une dérive lente du procédé.

En outre, la diversification et l'extension des tâches assignées à l'opérateur ne lui permettent plus d'effectuer une surveillance en continu de l'usinage. Une fois la production lancée et stabilisée, sa présence n'est plus vraiment justifiée. Par exemple, un seul opérateur peut être amené à superviser un îlot de production automatisée comprenant plusieurs MO qui usinent simultanément.

L'alternative serait l'automatisation de cette surveillance par l'utilisation d'un dispositif intégré à la MOCN. De manière plus générale, les universitaires et les industriels s'intéressent à l'automatisation de chaque niveau du process depuis un quart de siècle. En effet, elle tend à accroître la productivité, améliorer la qualité et réduire les coûts, notamment en main d'œuvre. Utilisée stratégiquement et avantageusement, l'automatisation du procédé de coupe permet de garantir une qualité constante en grande série, ainsi qu'une flexibilité dans la production de lots de petite taille [Lia02]. La rentabilité économique de l'automatisation pousse donc les industriels à demander des Systèmes de Surveillance Automatique de l'Usinage (SSAU) fiables, robustes,

performants et de mise en service aisée [Byr95]. Si tel est le cas, l'opérateur peut être réaffecté à d'autres tâches et le système de production acquiert de l'autonomie. La présence de l'opérateur est alors périodique : pour évacuer les copeaux, changer un outil ou charger des pièces sur des palettes, par exemple. Les SSAU sont donc nécessaires pour garantir un fonctionnement sécurisé des îlots ou des chaînes de production.

1.2. Principe de fonctionnement d'un SSAU

Le but d'un Système de Surveillance Automatique de l'Usinage est de s'assurer du bon fonctionnement du processus de fabrication. Si un incident est détecté, le système conduit alors une action de sauvegarde adéquate pour pallier le problème. Cette action est soit de type « réflexe » : pour une collision, par exemple, le mouvement d'avance est stoppé au plus vite ou un arrêt d'urgence est déclenché afin de limiter l'endommagement de la machine. Sinon elle est de type « intelligente », en jouant sur des paramètres opératoires : par exemple, en diminuant l'avance si une dent est endommagée, pour ne pas surcharger les autres dents. La Figure 2 illustre les fonctions attendues d'un système de surveillance.

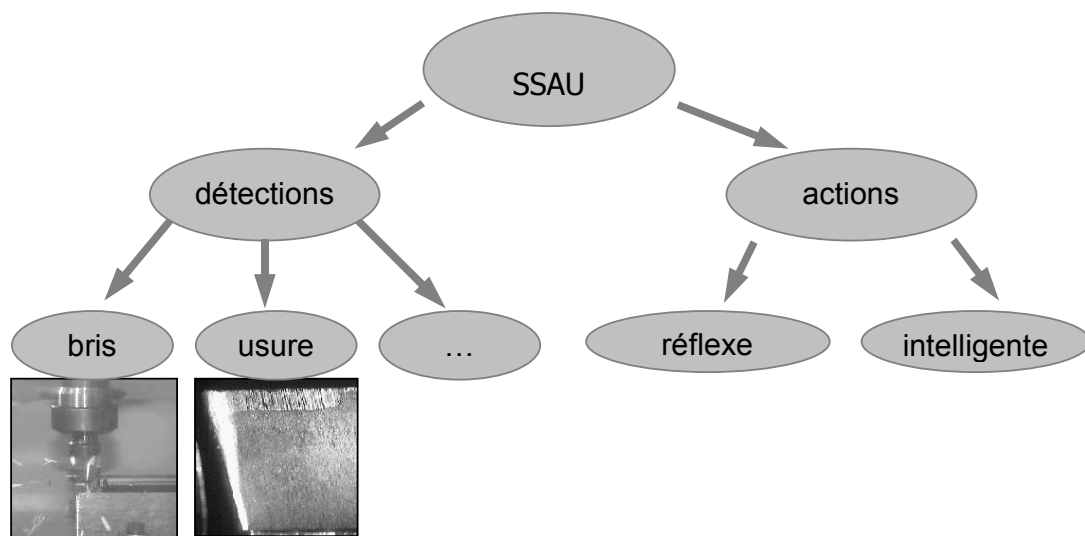


Figure 2. Principe de fonctionnement des SSAU.

L'action doit avoir lieu au plus tôt et, si possible, avant que des dommages ne soient causés. Par exemple, si une surcharge est constatée sur l'outil, il serait bon d'adapter les conditions de coupe avant que l'arête ne s'effondre. Pour que le système de production puisse établir si un accident va (ou vient de) survenir pendant la coupe, il a besoin d'informations sur le procédé de fabrication. L'idée est donc d'instrumenter la MOCN avec un ou plusieurs capteurs. Un moniteur de surveillance d'usinage peut alors traiter le ou les signaux, pour supprimer notamment le bruit, puis effectuer des tests pour déterminer si un incident a eu lieu. Si c'est le cas, la CN mène l'action de sauvegarde selon les instructions données par le moniteur.

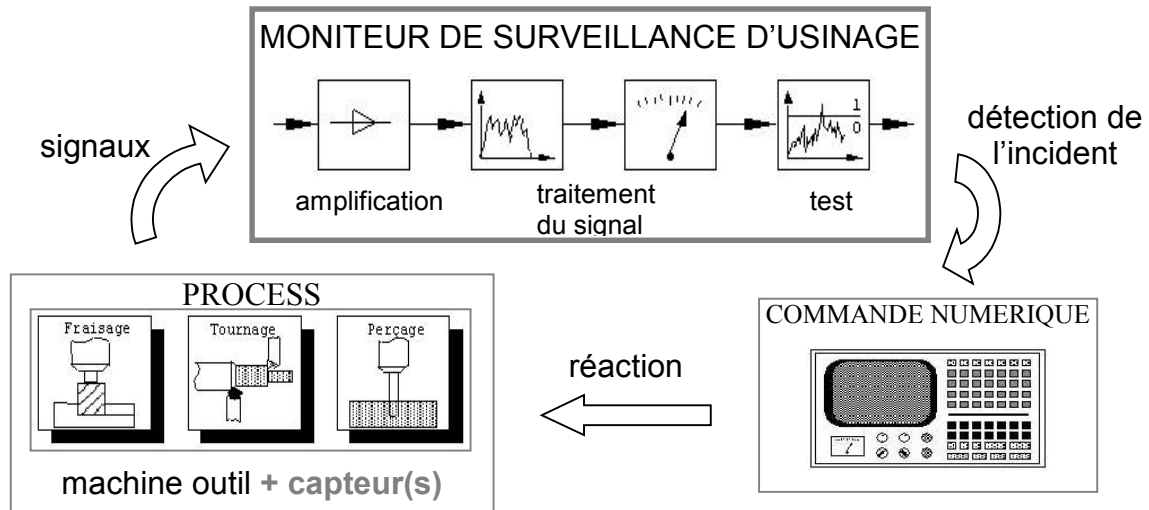


Figure 3. Principe de fonctionnement des SSAU.

Etant donnés les lourds investissements que nécessitent les MOCN, l'évolution vers une instrumentation est concevable. Prenons pour exemple l'automobile. De nombreuses fonctionnalités intelligentes et conviviales ont été permises par la multiplication des capteurs présents sur la voiture. Citons par exemple les systèmes de régulation de la fréquence de balayage des essuies-glace en fonction de la vitesse et de la pluie ou ceux qui gèrent l'éclairage des phares en fonction de la luminosité. Actuellement, le fonctionnement optimal d'un moteur de voiture classique grand public est assuré par la présence d'environ dix capteurs et d'un calculateur associé alors qu'il y a quarante ans, le seul capteur d'un moteur était celui de l'allumeur appelé la tête de Delco. L'ajout de capteurs permet d'augmenter l'intelligence d'un système. Il en va de même pour une CN, si l'on souhaite qu'elle soit plus intelligente, capable de détecter des incidents lors de la coupe, préparée à la maintenance [Mor04], la machine-outil doit être équipée de capteurs et de systèmes de surveillance automatique.

1.3. Méthodes de surveillance

Afin de détecter les incidents cités auparavant, on peut notamment étudier l'état de l'outil. Il en découle la classification suivante : les SSAU basés sur une observation *directe* de l'outil et ceux basés sur une observation *indirecte*, c'est-à-dire en suivant l'évolution d'une grandeur physique lors de l'usinage (les efforts de coupe par exemple). La surveillance est également menée soit *pendant l'usinage* (en continu), soit *hors usinage* (par intermittence) [Mic76].

1.3.1. La surveillance hors-usinage

Si elle est conduite hors usinage, la surveillance donne une information intermittente et différée dans le temps, sur le process. Ceci ne convient pas pour la détection de bris d'outil car la réaction doit être immédiate. Par contre, elle peut être appliquée pour observer une dérive lente du processus dont l'usure d'outil fait partie.

Une observation directe est alors possible : en mesurant l'usure en dépouille ou en cratère par exemple ou en contrôlant des témoins d'usure incorporés à l'outil. Elle peut aussi être indirecte : en mesurant l'état de surface de la pièce usinée ou en suivant l'évolution d'une dimension de la pièce sur des cartes de contrôle (MSP) [Bru94]. Si la pièce est observée les opérations sont effectuées en temps masqué et n'engendre pas de baisse de la productivité [Gar00].

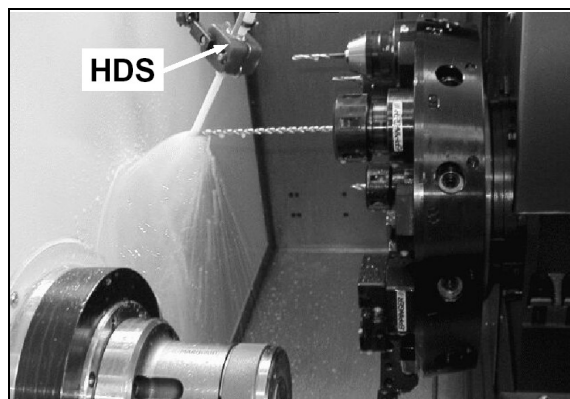


Figure 4. Détection de bris de foret hors usinage : par un jet de lubrifiant.

(Hydro Distance Sensor HDS de Nordmann)

1.3.2. La surveillance pendant l'usinage

Une surveillance pendant l'usinage donne une information en continu. Elle permet une réaction en temps réel et limite les dégâts. Une observation directe de l'outil (mesure de sa géométrie, de son usure, ...) serait plus précise mais elle est plus difficile à mettre en œuvre. Des systèmes de triangulation laser existent en rectification (IFW Hanovre). Pour le fraisage, une méthode de traitement de l'image a été développée mais elle n'est pas industrialisable car la caméra doit être placée à une faible distance de l'outil et la présence de copeaux et de saletés sur les plaquettes perturbent les mesures [Wei94]. Une observation directe n'est donc pas viable durant une opération de fraisage. Notons qu'une caméra peut également servir à assister l'opérateur dans sa tâche de surveillance : c'est généralement le cas en micro-fraisage ou sur de très grande machine comme dans l'aéronautique.

Les SSAU sont principalement basés sur une observation indirecte de l'état de l'outil, même si le traitement de l'information est plus complexe, notamment pour établir une corrélation avec l'usure. Notons que l'observation indirecte n'empêche pas d'effectuer, en complément, un palpé mécanique ou laser (hors usinage) si le système a un doute quant à l'endommagement d'un outil. Ce type de procédure est notamment utilisé en perçage avec des forets de faible diamètre pour lesquels un bris est difficilement détectable. La fiabilité du système est alors améliorée par ce contrôle supplémentaire [Gar00].

La surveillance pendant l'usinage est généralement effectuée par mesure des efforts de coupe, de la puissance ou de l'intensité consommée par la broche, des émissions acoustiques ou encore des vibrations, pour une question de robustesse et de fiabilité [Byr95]. Ces différents points seront développés ultérieurement. Mais d'autres recherches en tournage ont été menées en mesurant d'autres grandeurs physiques : le son, la résistance électrique (la pièce est observée), la température au contact entre l'outil et la pièce, une dimension ou l'état de surface de la pièce (par méthodes optiques ou par des ondes portées par un liquide de coupe),... Ces applications ne sont pas transposables au fraisage industriel à cause de la discontinuité de la coupe, de la rudesse de l'environnement industriel et de la complexité des surfaces réalisées [Byr95]. Néanmoins pour une surveillance efficace en fraisage, le SSAU doit au minimum effectuer une surveillance indirecte de l'état de l'outil pendant l'usinage.

1.4. Principaux objectifs attendus d'un SSAU

Les SSAU n'ont de sens que si leur installation et leur utilisation sont économiquement rentables. Dans le montant global d'investissement, il y a le coût d'achat du moniteur et du capteur, le coût d'implantation sur la machine (différent selon la technologie de SSAU et selon si la MOCN est neuve ou réhabilitée) et enfin les coûts de réglage (temps passé jusqu'à ce que l'opérateur soit libéré de la surveillance) [Tan88]. En contrepartie, des gains financiers sont attendus et, si l'on parle de protection des matériels, il s'agit d'éviter de lourdes pertes. Des profits résultent également d'une augmentation de la productivité. Les temps de non-productivité sont réduits. En cas d'incident grave, type collision, un SSAU permet de limiter les dégâts en intervenant au plus tôt. Ainsi la broche, qui est l'élément le plus sensible des machines UGV, est protégée au mieux, tout comme la structure de la machine.

Pour les changements d'outils, la détection de la limite d'usure permet d'optimiser la date de changement. Ce changement n'a plus lieu suite à plusieurs contrôles de l'opérateur ou parce qu'une durée pré-déterminée s'est écoulée mais parce que l'usure réelle a atteint sa limite. La production moyenne d'un outil est alors accrue de 30% [Bar91], d'où moins de changements d'outils et une meilleure productivité du process. Pour cela, l'estimation de l'usure doit être suffisamment précise.

L'organisation du travail de l'opérateur évolue. Sa présence au pied de la machine n'est plus continue mais intermittente, comme pour évacuer les copeaux, recharger la machine en pièces. Néanmoins, les dates de changement d'outil deviennent flexibles (usure limite atteinte) et non plus planifiées. Cela peut poser des problèmes de planification des tâches de l'opérateur. Plus généralement, la maintenance curative est ramenée à son strict minimum mais la maintenance préventive peut également être amoindrie si le système de production est doté d'un outil de diagnostic plus complet associé à la surveillance d'usinage afin de s'orienter vers de la maintenance prédictive. En production continue, les temps d'arrêt peuvent ainsi être diminués.

L'instrumentation de la machine permet également à la CN de détecter un contact outil/pièce et ainsi de réduire le temps de cycles en cas de variations dimensionnelles des pièces brutes. Ce gain de temps n'est pas négligeable pour le procédé de rectification.

Enfin, en cas d'écaillage de l'outil ou d'usure excessive, la réaction est immédiate. Si l'incident n'est détecté que lors du contrôle final de la pièce à la sortie de la chaîne de transfert, plusieurs pièces auront été usinées entre l'instant de l'incident et sa détection. Avec un SSAU, le nombre de pièces rebutées ou à retoucher est ainsi plus faible, épargnant la perte de temps correspondante.

Sur le long terme, ce gain de productivité va engendrer un amortissement plus rapide des investissements de machines. Par ailleurs, les capteurs placés sur la machine permettent à l'entreprise d'enrichir sa base de données sur ses process. Elle pourra ainsi mieux les optimiser.

Côté automatisation de la production, de nombreuses avancées ont été réalisées : avec la palettisation ou la robotisation pour l'approvisionnement en pièces, avec l'utilisation d'un magasin d'outils par Centre d'Usinage (CU - notons qu'ils peuvent être reliés entre eux ainsi qu'au magasin d'outillage de l'atelier), avec les convoyeurs de copeaux ainsi que des systèmes de communication de données techniques avancés (cartes Ethernet intégrées). On tend donc vers un système de production entièrement automatisé où seule une supervision serait nécessaire. Les SSAU représentent actuellement un verrou important, ne permettant pas aux systèmes de production flexible de passer à un plus haut degré d'automatisation. C'est notamment pour cela

que depuis plus de 20 ans, de nombreux travaux de recherche ont été effectués dans le domaine de la Surveillance d'Usinage.

Par ailleurs, les SSAU permettent d'améliorer la sûreté de fonctionnement du process. Ils protègent notamment l'outil de production des endommagements [Tan88]. Ceci est dû au très faible temps de réaction de ces systèmes électroniques (3 ms pour une collision chez Montronix). Ce point prend encore plus d'importance en UGV où les investissements sont conséquents. Les vitesses d'avance élevées impliquent une énergie cinétique mise en jeu plus importante. Les dégâts peuvent donc être considérables. La broche doit être particulièrement bien protégée. Etant données les fréquences de rotation utilisées, un déséquilibre ne peut être permis. En cas d'incident en UGV, la réaction doit donc être quasiment immédiate afin de limiter les endommagements.

Lors de l'usinage de pièces à forte valeur ajoutée (pièce de structure aéronautique, moule ou matrice d'emboutissage), il s'agit généralement de pièces de taille importante, taillées dans des bruts coûteux ou dans la masse ou dans un matériau onéreux comme certains alliages à base nickel ou certains composites. La réalisation de la pièce est longue, notamment si des traitements thermiques sont nécessaires. Si un incident survient en fin de gamme, la mise au rebut de la pièce représente une perte nette importante pour l'entreprise ou de longues retouches sont nécessaires. Un SSAU peut dans ce cas s'avérer un investissement rentable.

Nous pouvons donc résumer l'intérêt d'utiliser un SSAU sur une MOCN aux points suivants :

- Augmenter la productivité
- Moins de temps non-productifs
- Autonomie de la MOCN / opérateur
- Meilleure gestion des outils / usure
- Moins de rebuts et de retouches
- Optimisation grâce à la BdD process
- Amélioration de la sûreté
- Protection de la machine
- Réaction rapide avant dégâts importants
- Protection des pièces à forte valeur ajoutée
- Détection de tout dysfonctionnement de la machine.

Afin d'atteindre ces objectifs, un SSAU se doit d'analyser les phénomènes qu'il mesure avec fiabilité ; et de prendre les décisions adéquates pour mener des actions correctrices ou des actions réflexes.

1.5. Principes d'analyse d'un SSAU

La majorité des SSAU présents dans l'industrie, fonctionnent selon un principe de seuils et de courbes enveloppes.

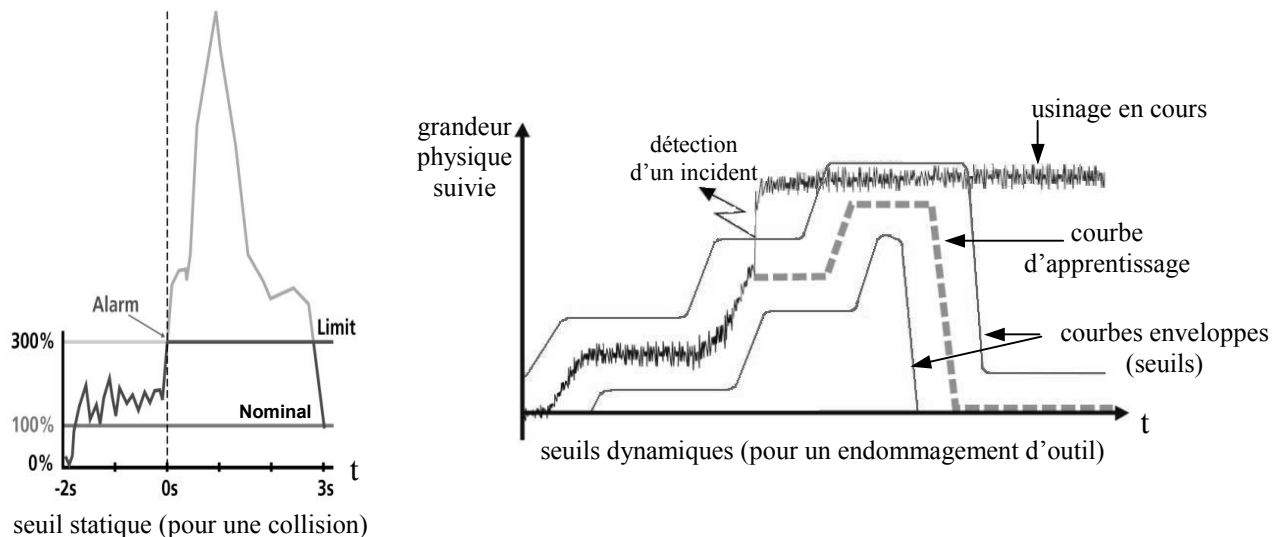


Figure 5. Différents types de seuils : fixe à gauche, courbes enveloppes à droite [Klu03].

Le principe est simple : Grâce au capteur placé sur la machine, le SSAU peut suivre l'évolution d'une grandeur physique au cours de l'usinage. Si elle franchit un seuil, le système en déduit qu'un incident est survenu. La difficulté réside dans la détermination de la valeur de ces seuils.

Les seuils peuvent être statiques, c'est-à-dire constants par rapport au temps. Ce type de seuil est généralement utilisé afin de détecter une collision. La valeur du seuil peut être rentrée manuellement dans le SSAU ou via un programme. Pour cela, il faut avoir connaissance d'une valeur pertinente, soit par l'expérience de l'opérateur ou soit grâce à une base de données. Notons que l'intervention humaine peut être source d'erreur. Cependant pour détecter une collision, le seuil n'a pas besoin d'être placé avec précision car la grandeur suivie va fortement augmenter et donc franchir le seuil. Le principal objectif est de protéger la machine d'endommagements (en cas de trajectoire aberrante par exemple). Les seuils peuvent également varier au cours du temps. Ils sont alors appelés « seuils dynamiques ». En effet, si, sur le graphe de droite de la Figure 5, un seuil constant avait été placé au-dessus de la valeur maximale, l'incident n'aurait pas pu être détecté. Les seuils doivent donc être placés d'une manière plus

précise et c'est la raison pour laquelle des courbes enveloppes définissent une zone à l'intérieur de laquelle le signal mesuré peut évoluer. Si lors de l'usinage d'une pièce, ces courbes enveloppes sont franchies, cela signifie qu'un incident est arrivé. Ces courbes sont placées de part et d'autre d'une courbe de référence. Cette dernière est obtenue par l'enregistrement du signal du capteur, lors de l'usinage d'une ou plusieurs premières pièces ; avec un outil neuf et des conditions identiques à celles de la production (et pour lequel aucun incident n'a eu lieu bien sûr). Cette tâche est appelée « apprentissage ».

Il faut ensuite régler les seuils, c'est-à-dire positionner les courbes enveloppes par rapport à la courbe d'apprentissage. Ce réglage peut être manuel : l'opérateur doit alors rentrer des données dans le SSAU (diamètre outil, valeurs de seuils ...). L'apprentissage peut également être automatique : Dans ce cas, le système possède des données pré-réglées en usine qui lui permettent de déterminer le niveau des seuils [Bla03]. Le réglage des seuils est ensuite affiné, grâce à des connaissances heuristiques. Il peut être nécessaire de recommencer cet apprentissage pour chaque nouvel outil ou lot de matière usinée. Cette méthode implique donc une préparation longue et laborieuse avant que le SSAU ne puisse gérer la production de manière autonome [ODo01].

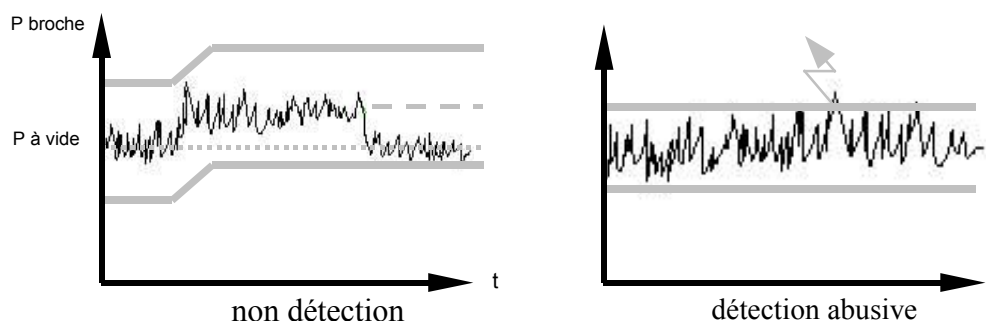


Figure 6. Problématique du positionnement des niveaux des seuils.

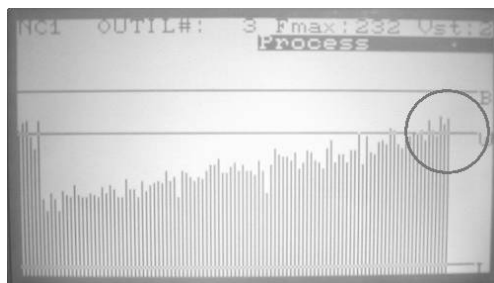
Le réglage du niveau des seuils est un point névralgique. La fiabilité du système en dépend directement. C'est le point le plus important aux yeux des industriels [Byr95]. Si les seuils sont trop éloignés de la courbe d'apprentissage, l'incident ne va pas être détecté. Prenons l'exemple de gauche de la Figure 6, il s'agit d'une opération de fraisage réalisée avec un faible engagement radial. La différence entre la puissance consommée par la broche à vide et lors de l'usinage est faible, si bien que le bris n'est pas détecté. Inversement, à droite de la Figure 6, les seuils sont trop proches et le système s'est déclenché abusivement. Ces détections abusives sont un réel problème. Si leur nombre devient trop important, le temps perdu avant chaque reprise de la production fait chuter la productivité, le SSAU n'a plus d'intérêt économique et il est purement

et simplement débranché par l'opérateur [Jem95]. Le réglage des seuils est notamment délicat à cause de l'aspect stochastique du process. De nombreux phénomènes sont à l'origine de cette variabilité : ceux relatifs à la coupe (comme l'usure) et ceux relatifs au système de production (comme le type de pièce à usiner). O'Donnell et al. [ODo01] précisent un certain nombre de ces sources de variabilité.

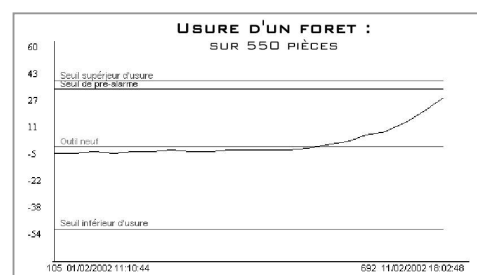
Le réglage est tributaire des conditions dans lesquelles s'est déroulé l'apprentissage. Si le lot de matière change par exemple, un réglage qui était parfait, peut être à refaire. Ces seuils, même s'ils sont appelés « dynamiques », sont fixes et rigides. Ils ne permettent pas de souplesse dans le traitement de l'information, qui pourrait en améliorer la fiabilité [Jem99].

L'usure fait augmenter progressivement les efforts de coupe. Une approche possible est d'évaluer par calculs les valeurs de seuils à partir de modèles de coupe, de lois d'usure et de modèles comportementaux couplant usure et efforts [Fur94]. Cependant, avec des modèles d'efforts classiques, on se retrouve dans la problématique d'apprentissage à chaque cas.

De plus, si un simple seuil peut suffire en tournage (Figure 7), la complexité de la coupe en fraisage nécessite un traitement de l'information plus poussé. Suite à un apprentissage, la technique généralement utilisée est basée sur un calcul de l'aire sous la courbe. Si le signal est celui de la puissance de broche, l'analyse est effectuée sur l'énergie nécessaire pour réaliser une opération donnée. Comme l'usure fait légèrement augmenter les efforts de coupe, sa manifestation sera plus facile à observer par une intégrale. Cette technique de calcul permet également aux SSAU de détecter plusieurs pièces plus tard, des endommagements de l'outil (de type écaillage) qui n'avait pas été détectés sur le moment.



Par les efforts maxi, tournage (source : BRANKAMP)



Par l'énergie consommée, perçage (source : DIGITAWAY)

Figure 7. Principe d'analyse de l'usure.

Une autre technique pour détecter l'endommagement de l'outil consiste à utiliser la dérivée des signaux. Sur les zones de l'usinage de la pièce où les conditions de coupe sont stables, des seuils très serrés sont placés de part et d'autre de la dérivée de la courbe d'apprentissage. C'est cette dernière technique qui permet de détecter les endommagements de l'outil les plus faibles.

L'apprentissage et le réglage des seuils sont des tâches laborieuses à exécuter sur la plupart des SSAU industriels. Les systèmes sont alors relativement fiables, surtout si les différents paramètres restent dans une faible plage de variation [Byr95]. Cette solution reste donc adaptée pour des productions de grandes séries et c'est pourquoi les SSAU sont plus particulièrement implantés dans l'industrie automobile.

Par contre, la méthode pose un problème majeur dans un cadre plus général : le principal inconvénient est de devoir usiner plusieurs pièces, avant de ne pouvoir commencer à surveiller la production (c'est-à-dire avant que la production ne soit sécurisée et que la qualité des pièces soit garantie). Ce principe est donc incompatible avec une production flexible, comprenant des lots de petite et moyenne taille [Kae99]. Un exemple classique est celui des moules et des matrices, où les pièces sont généralement unitaires. Dans ce cas, l'usinage d'une première pièce (coûtant de 100 K€ à 1M€) simplement pour régler le SSAU, est inimaginable ! Les solutions proposées par les fabricants de SSAU ne sont donc pas compatibles avec ce type de production. L'offre du marché ne répond pas à ce problème. L'attente est pourtant forte du côté des fabricants de pièces à forte valeur ajoutée. En effet, tout incident survenant notamment en fin de gamme de fabrication, doit être évité, ou du moins pris en charge suffisamment tôt pour limiter : au mieux les retouches et au pire de devoir mettre la pièce au rebus. Il en est de même pour l'aéronautique, où la production est flexible (usinages répétés ou non d'un faible nombre de pièces) : il n'existe pas de solution de surveillance d'usinage viable actuellement. Ne pouvant sécuriser leur production, ces industriels doivent généralement utiliser des paramètres opératoires plus modestes et donc moins risqués, mais qui nuisent à la productivité.

C'est pourquoi les travaux présentés dans ce manuscrit vont être consacrés à trouver une solution permettant de surveiller les productions flexibles en fraisage, et ainsi répondre à l'attente industrielle.

2. Instrumentation de la machine outil

Pour améliorer la performance d'un système en élevant son niveau « d'intelligence », il faut l'instrumenter pour lui permettre d'acquérir et traiter l'information. En effet, en dehors du déplacement de ses axes et de la rotation de la broche, la MOCN ne sais pas ce qui se passe lors de l'usinage d'une pièce. Il faut donc installer des capteurs, pour ainsi « lui rendre la vue ».

Lors du projet européen IDMAP, Furet et Garnier ont mené une analyse complète du potentiel d'instrumentation des MOCN, Figure 8 [Ket01].

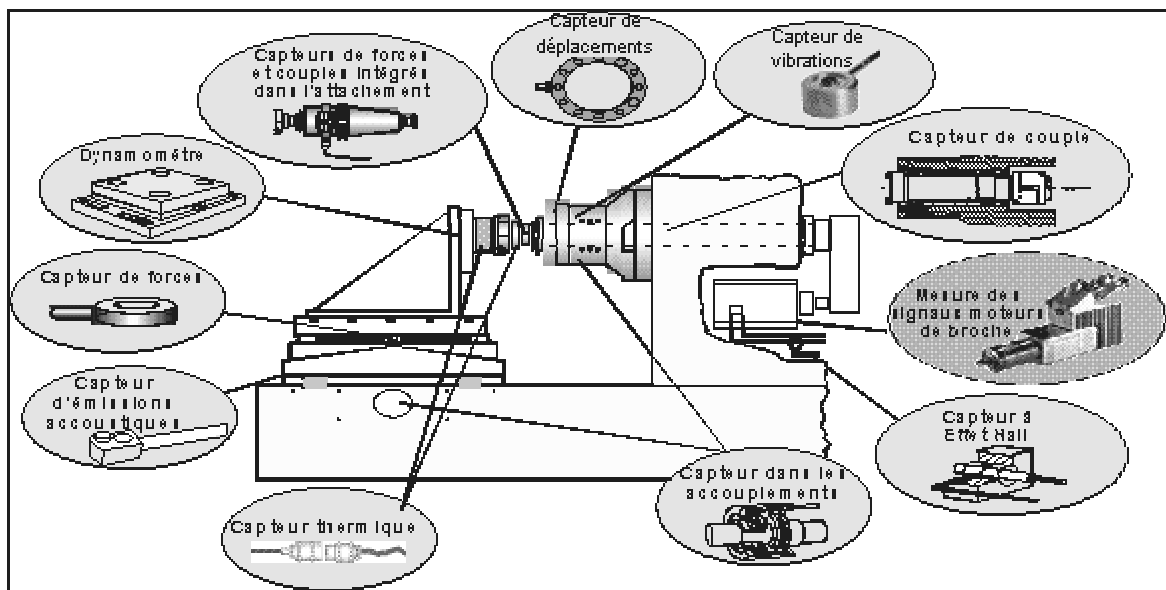


Figure 8. Possibilité d'implantation de capteurs sur CU.

Les possibilités sont donc nombreuses mais le choix du capteur est primordial pour la performance du SSAU. Il doit répondre aux attentes suivantes [Tön88] :

1. Faible coût ; utilisation, installation, entretien faciles, pas d'usure,
2. Pas de restriction de l'espace de travail ni des paramètres de coupe utilisables,
3. Pas d'interférence avec la machine (raideur),
4. Mesure aussi proche que possible du lieu de la coupe,
5. Robuste envers son environnement (saleté, copeaux, lubrification, perturbations mécaniques, électromagnétiques et thermiques),
6. Précis, bonne résolution et bande-passante et sensibilité adaptées.

La position du capteur est aussi importante que son choix. Pour des capteurs d'efforts ou d'émissions acoustiques notamment, une étude par éléments finis peut être menée afin de juger de la pertinence du placement [Cho99a]. Notons également l'importance du conditionnement des signaux. Pour une ébauche avec une grosse fraise ou une finition avec un outil plus fin, les grandeurs ne sont pas du même ordre et la sensibilité du capteur requise n'est pas la même. Le SSAU doit pouvoir adapter le niveau du signal, comme c'est le cas sur certains systèmes de Prometec [Jem99]. Lors de l'usinage, les capteurs (effort, EA, vibration et déplacement) sont principalement sensibles à la charge appliquée à l'outil (efforts moyens), puis à la formation des copeaux (efforts instantanés), aux vibrations de la broche et enfin aux déflexions de l'outil [Kan01].

Nous allons maintenant étudier les différentes grandeurs physiques pouvant être observées ainsi que les technologies de capteur adaptées à la Surveillance d'Usinage.

2.1. Efforts

L'usinage est un procédé de fabrication par enlèvement de matière. Cette opération génère des efforts pour déformer plastiquement, séparer et enlever la matière. L'étude des actions mécaniques en usinage est donc nécessaire car elle renseigne sur les interactions entre l'outil et la pièce, et en conséquence sur l'état de l'outil. Pour une surveillance indirecte de l'usinage, les efforts sont une source d'information très complète car ils sont intrinsèquement liés à la mécanique de la coupe. Dans le cadre universitaire comme industriel, ils sont utilisés en tournage [Ans95]. L'outil est fixe. Il est plus facile de l'instrumenter et de répondre aux attentes n°3 et 4 présentées en début de paragraphe. Par contre, en fraisage, pour satisfaire les points 2, 3 et 5, un suivi de la puissance est préféré.

2.1.1. Jauge de contraintes

Il s'agit en fait de jauges de déformations. Le principe est le suivant : une augmentation des efforts en traction sur un fil métallique va faire diminuer sa section et ainsi diminuer proportionnellement sa résistance électrique. Les avantages sont les suivants : faible encombrement, précision, pas de dérive des mesures sur une longue période d'utilisation, faible sensibilité aux variations de température, fréquence de résonance élevée. Par contre, ils n'ont pas une très grande plage de mesure et surtout ils ont un faible niveau de sensibilité, car le principe de mesure dépend avant tout de la raideur du fil. Leur utilisation n'est envisageable qu'en opération d'ébauche [Sch90].



Figure 9. Exemple de jauge industrielle (Jauge de contrainte Brankamp).

Les jauges peuvent être placées dans les accouplements, au niveau des vis à billes des axes, pour mesurer les efforts d'avance ou sur les paliers de broche. Dans ce cas, un filtre passe bas doit être appliqué pour nettoyer le signal du passage des rouleaux ou des billes. Les caractéristiques haute fréquence du process ne peuvent donc pas être observées. Pour une intégration plus facile, les jauges sont souvent placées sur des bagues des paliers ce qui a tendance à diminuer la rigidité globale de la broche [Sch90].

2.1.2. Capteur piézoélectrique

Une pression appliquée sur un cristal de quartz crée une charge électrique qui est proportionnelle à la charge mécanique et sans hystérésis. Les avantages sont une très grande sensibilité, une grande plage de mesures, une grande rigidité, une très grande précision et une bande-passante très large. Par contre, une dérive apparaît après des mesures sur une longue période de temps (perte de la charge électrique pour une charge mécanique statique). Comme les opérations d'usinage dépassent rarement 30s, la dérive n'est pas significative [Ket01].



Figure 10. Capteur piézoélectrique [Klu03].

La plupart des applications mesurant les efforts dynamiques sont basées sur cette technologie. Le temps de retard du signal est de seulement 1ms. Ils conviennent donc particulièrement pour la détection de collision.

Pour une intégration plus facile sur les machines, ils peuvent être placés sur des plaques ou des bagues. On les retrouve généralement sur les tourelles porte-outil en tournage. Sinon une modification de la broche ou de la tourelle est nécessaire.

En fraisage, des platines d'effort ou tables dynamométriques sont proposées. Il s'agit de capteurs piézoélectriques placés sous le porte pièce. Leur coût est très élevé (à partir de 18 000 € [Pri99]). De plus, elles sont fragiles et peuvent être endommagées en cas de choc. Leurs dimensions limitent l'espace de travail (usinage de pièce de moins de 600x400 mm) et des portes-pièces spécifiques doivent être réalisés. Pour toutes ces raisons, les tables dynamométriques ne peuvent pas être utilisées industriellement. Les tables dynamométriques utilisées en fraisage mesurent généralement les actions mécaniques suivant les 3 directions (X, Y et Z) ; mais Couétard a développé une table permettant de mesurer les 6 composantes du torseur statique. Il est alors possible d'étudier les moments générés à la pointe des dents de l'outil, lors de la formation du copeau [Tou97].

La fréquence de résonance des tables dynamométrique est d'environ 2000 Hz mais peut diminuer rapidement à cause du poids de la pièce usinée [Kis01]. Par exemple, pour une fréquence de broche de 15 000 tr/min (ce qui correspond à une fréquence de 250 Hz) et un outil à deux dents, la fréquence des sollicitations est de 500 Hz. La 2^e ou 3^e harmonique peut alors être très proche de la fréquence propre de l'ensemble table/pièce et les mesures vont être perturbées. Les tables dynamométriques sont donc moins précises en UGV. C'est pourquoi Lapujoulade propose de compenser ces vibrations en plaçant des accéléromètres sur la partie supérieure de la table. Il a également augmenté la raideur de cette dernière, la bande-passante est étendue jusqu'à 5 kHz [Lap03]. Il est alors possible d'effectuer des mesures d'efforts de coupe sans vibrations et dans des conditions d'Usinage à Grande Vitesse, ce qui n'est pas possible autrement.

Les tables dynamométriques restent néanmoins l'outil de prédilection pour effectuer un travail de recherche expérimental. La précision des mesures permet d'établir des relations entre les efforts de coupe et les paramètres opératoires, ainsi que de valider des stratégies de surveillance d'usinage [Pri99]. Les signaux d'effort contiennent de nombreuses informations, notamment quant à l'état de l'outil et son niveau d'usure [Gar00]. Enfin, elles sont également utilisées pour l'étalonnage de nouveaux instruments de mesure.

Industriellement, en fraisage, la grande difficulté de la méthode proposée est l'acquisition des efforts. Pour résoudre ce problème, les fabricants de capteurs ont conçu les dynamomètres rotatifs. Un empilage de rondelles de quartz sensibles au cisaillement, permet de mesurer le couple appliqué à l'outil. Il est ensuite transmis au stator sans contact, par télémetrie. Certains modèles permettent en plus de mesurer les efforts axiaux, voire les efforts radiaux. Récemment, un capteur pour l'UGV, bien équilibré, avec un cône HSK et une fréquence de résonance de

5 kHz (constante ici car non affectée par la masse de la pièce) a été proposé commercialement. La transmission d'information du rotor au stator est limitée à 1 kHz [Kis03]. Ces capteurs de couple sont particulièrement utilisés en taraudage où une grande sensibilité est requise. Ils sont proposés pour les applications de perçage et taraudage multibroches. En fraisage, leur sensibilité pourrait notamment être utile en finition pour mesurer les faibles efforts de coupe. Néanmoins la limitation du débit de données est un facteur discriminatoire. L'autre principal inconvénient des capteurs rotatifs est que tous les portes-outils doivent en être équipés, ce qui entraîne un surcoût.



Figure 11. Bague d'effort [Kis00].

Il est également proposé d'intégrer une bague d'efforts à la broche (Figure 11). Elle permet de mesurer les efforts appliqués à l'outil selon les trois directions, quelle que soit la cinématique de la machine. Elle est placée entre le logement de broche et le flasque puis précontrainte pour ne pas trop affecter la raideur de la broche. Comme pour tout capteur, tout élément se trouvant entre lui et le phénomène à étudier peut introduire des perturbations. Ici, les paliers et la partie tournante de la broche introduisent du bruit. Le déséquilibre dynamique de l'ensemble outil/porte-outil/broche est facilement mesurable avec une telle bague. Il peut être identifié à vide. Il est alors soustrait du signal mesuré pendant l'usinage afin d'effectuer une surveillance plus précise [Jun02]. Pour une table dynamométrique, il faut que l'outil soit en contact avec la pièce et qu'il usine pour identifier un déséquilibre dynamique. Le traitement est plus complexe.

De manière plus générale, l'étude de la signature de broche permet d'effectuer un diagnostic de l'état de la broche, et de l'usure des paliers, des défauts de coaxialité, ... Une approche plus complète mais également plus complexe a été menée afin d'éliminer les distorsions entre les efforts de coupe et le signal mesuré. Dans un premier temps, Park et Altintas proposent d'évaluer, à la fois analytiquement et expérimentalement, la fonction de transfert (réponse en fréquence ou *FRF*) entre les efforts mesurés par la bague et ceux générés à l'extrémité de l'outil. Dans un second temps, un filtre qui est l'inverse de cette fonction de transfert, est appliqué aux mesures afin d'en déduire les valeurs des efforts à l'extrémité de l'outil. Il est ainsi montré qu'il

est possible de supprimer les distorsions dues à l'excitation d'un mode propre de la broche ou de l'outil par les efforts de coupe ou leurs harmoniques. L'exemple est donné avec une sollicitation du premier mode de résonance de la broche (432Hz) par un outil à 4 dents tournant à 7 000 tr/min, soit une fréquence de 467 Hz [Par03].

Des études ont ainsi été menées afin de qualifier cet instrument de mesure. La bague d'efforts s'est montrée être un sérieux candidat pour effectuer une surveillance d'usinage en fraisage, basée sur l'utilisation d'un modèle prédictif des efforts de coupe [Jun02]. Par exemple, un perçage avec un foret de 2 mm à 15 000 tr/min peut être correctement observé alors que ce n'est pas possible avec un dynamomètre rotatif qui ne doit pas être utilisé au delà de 10 000 tr/min [Kis00]. Cependant, il reste encore de nombreux développements à réaliser avant d'aboutir à son exploitation industrielle par le fait du surcoût très important sur la broche.

2.2. Puissance ou courant

La puissance consommée par les moteurs et les efforts sur les effecteurs sont des grandeurs physiques qui évoluent de façon similaire. Lorsque la puissance de broche est mesurée, on obtient le couple appliqué à l'outil et lorsqu'il s'agit des moteurs d'axe, on obtient l'action mécanique selon cet axe.



Figure 12. Capteur à effet Hall [Klu03].

Sur les moteurs de broche, un capteur de puissance mesure la puissance active consommée par le moteur. Pour cela, la tension et le courant sont mesurés. Le courant peut être mesuré grâce à la technique du « shunt » : Les câbles d'alimentation du moteur de broche sont sectionnés et une pièce (faite de manganin) est soudée entre. Sa résistance étant connue, l'intensité passant dans chaque câble est déduite d'une mesure de tension. Cette technique s'avère très précise car elle est effectuée au plus près du passage du courant.

Sinon, l'intensité est généralement mesurée par un à trois capteurs à effet Hall (Figure 12) : l'anneau est passé autour des câbles d'alimentation du moteur et le flux de courant est mesuré. En monophasé, un seul capteur suffit. Pour un moteur triphasé (la plupart aujourd'hui), il est conseillé d'utiliser trois capteurs équilibrés afin d'éliminer les erreurs de déphasage qui peuvent être importantes [Mon96]. Certains constructeurs n'utilisent que deux capteurs à effet Hall

(méthode des 2 Wattmètres). Certaines recherches sont menées avec un seul capteur [Liu96], au détriment de la précision. Les courants sont mesurés sur le stator car cela n'est pas possible sur le rotor.

Rappelons que ces courants de phase (I_u , I_v ou I_w) tournent n fois plus vite que l'axe du moteur, si n est le nombre de paires de pôles du moteur (au glissement près pour un moteur asynchrone). Pour utiliser cette information, il faut passer de ces valeurs triphasées alternatives à une valeur continue. Pour cela, citons deux techniques. La valeur efficace du courant (ou RMS, Root Mean Square) peut être calculée par l'équation (3.1). Généralement un filtrage passe-bas est installé pour éliminer une partie du bruit. Cette méthode simple est très largement utilisée dans l'industrie pour donner un équivalent continu et instantané au courant alternatif [Li01]. Selon le modèle de Park, il est également possible de définir un équivalent diphasé au réseau triphasé. Les courants sont calculés dans un repère $\{d,q\}$ lié au champ tournant du stator. Calculé par l'équation (3.2) où θ représente l'angle du courant statorique de la phase U, I_q est alors continu [Lee95] :

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{3}(I_U^2 + I_V^2 + I_W^2)} \quad 1$$

$$I_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ I_U \cos \theta + I_V \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + I_W \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \quad 2$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad 3$$

Plusieurs universitaires ne traitent que du courant [Alt92] [Lee95] [Liu96] [Li99]. Pourtant, sur moteur triphasé et à faible charge, le suivi du courant est moins précis que celui de la puissance. La puissance consommée varie quasi linéairement par rapport à la charge alors que le courant est moins sensible à la variation d'un faible couple (voir Figure 13 [Art02]).

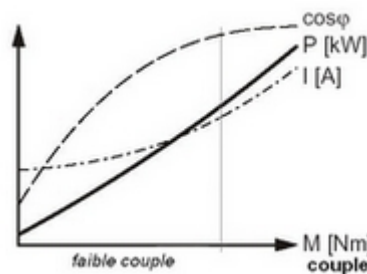


Figure 13. Linéarité de la puissance par rapport au couple [Art02].

La valeur efficace et instantanée de la puissance active est obtenue selon l'équation (3) par le capteur de puissance qui l'élabore à partir des valeurs efficaces du courant, de la tension et du déphasage φ . Généralement un traitement au niveau du moniteur ou du transducteur permet de soustraire la valeur moyenne de la puissance consommée lorsque le moteur de broche tourne à

vide. La puissance réellement consommée par la coupe est alors obtenue. C'est à partir de cette valeur que la surveillance d'usinage est effectuée.

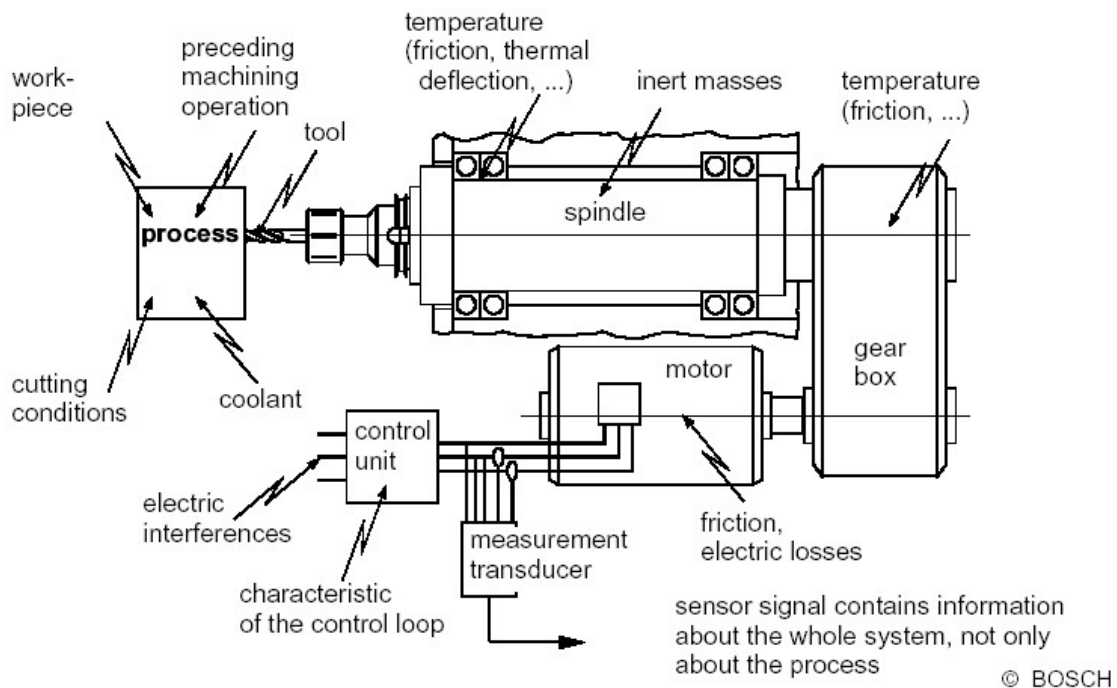


Figure 14. Sources de perturbation des signaux de puissance [Ket01].

Quelles informations sont contenues dans les signaux de puissance ? Le résultat de la mesure n'est pas uniquement influencé par la coupe mais aussi par l'ensemble du système, depuis le variateur et jusqu'à l'outil, illustré dans la Figure 14. Ainsi, cette grandeur physique devant caractériser les efforts est perturbée. Des universitaires Mexicains ont mené une analyse fréquentielle du courant de la boucle d'asservissement afin d'élaborer le gabarit d'un filtre passe-bande à partir des spectres relatifs aux différents phénomènes [Rom03]. On notera que le bruit de commutation, notamment généré par l'ondulateur de tension (en Modulation de Largeur d'Impulsion, MLI) du variateur de vitesse, est situé au delà de 10 kHz. C'est pourquoi il faut au minimum appliquer un filtre passe-bas coupant à cette fréquence.

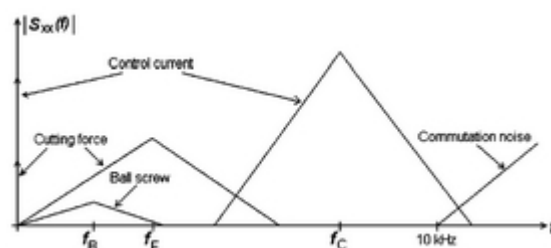


Figure 15. Composantes fréquentielles du courant [Rom03].

Plus généralement, le signal est comme lissé à cause des phénomènes inertiels liés aux masses en rotation ainsi qu'aux frottements [Byr95]. Ainsi, ce sont les caractéristiques dynamiques de la boucle d'asservissement du servomoteur qui déterminent la bande passante d'un système de mesure basé sur le courant ou la puissance consommée par un moteur [Lee95]. En 1983, Bertok et al. estiment la largeur de la bande passante à 10 Hz [Ber83]. Sur des technologies plus récentes, elle est évaluée à 62 Hz [Lee95], à 70 Hz [Kim99]. Aujourd'hui, il n'est pas rare que la qualité de l'asservissement autorise une bande passante de 100 Hz mais ceci reste encore trop faible pour surveiller des opérations de fraisage réalisée avec des conditions industrielles [Pri99]. Par contre, cette approche est plus intéressante lors de l'utilisation de moteurs linéaires car la bande passante peut alors être d'au moins 1 kHz [Tön03].

C'est pourquoi, lorsque, dans la littérature, des expérimentations sont basées sur la puissance ou le courant, des fréquences de broche très faibles et peu réalistes sont utilisées, afin de ne pas trop lisser le signal. Par exemple, Lee et al. ont choisi une fréquence de passage des dents de 18 Hz ($N = 360$ tr/min, Figure 16). Un léger lissage est pourtant déjà visible par rapport aux mesures de la table dynamométrique [Lee95].

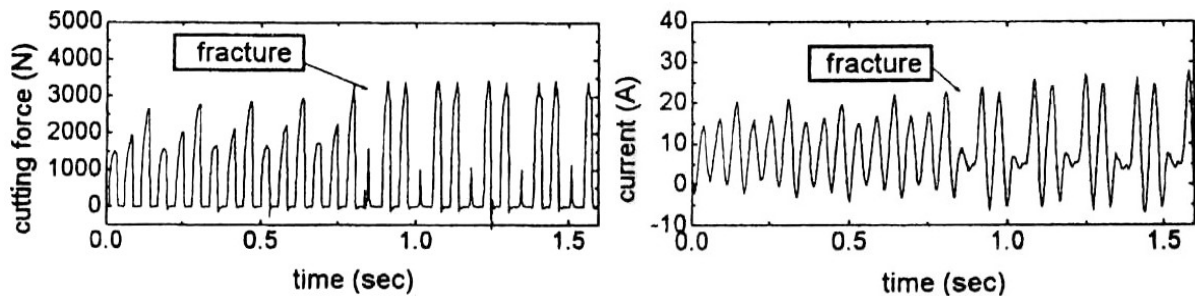


Figure 16. Phénomène de lissage du signal de courant [Lee95]

(Fréquence de passage des dents : 18 Hz ; bande passante du servomoteur : 62 Hz).

Outre la qualité de l'asservissement, la sensibilité de la puissance mesurée dépend également du chargement du moteur par rapport à la puissance consommée à vide et la puissance maxi de la broche. Par exemple pour une broche de 15 kW, le perçage de plus faible diamètre qui peut être surveillé dans de l'aluminium, est de 1,8 mm [Nor03].

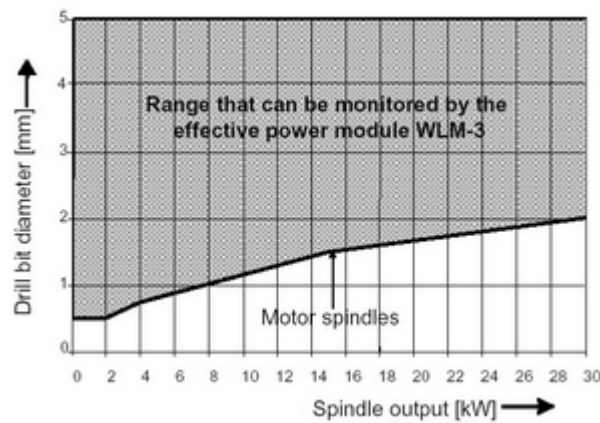


Figure 17. Courbe du diamètre de foret minimal pouvant être surveillé [Nor03].

Le capteur de puissance génère un signal retardé de 10 à 15 ms. Ceci est dû aux caractéristiques passe-bas du servomoteur [Max88] et donc à sa bande-passante et à la fréquence de passage des dents. De par le retard du signal, ce capteur convient peu pour détecter une collision à grande vitesse. Par contre, le temps de retard est compatible avec la détection de bris d'outil [Klu03]. Par une analyse poussée des signaux de puissance, il est possible de suivre l'évolution de l'usure [Fur94] [Gar00]. Ce capteur permet également d'effectuer de la commande adaptative et de l'optimisation de process [Pri99].

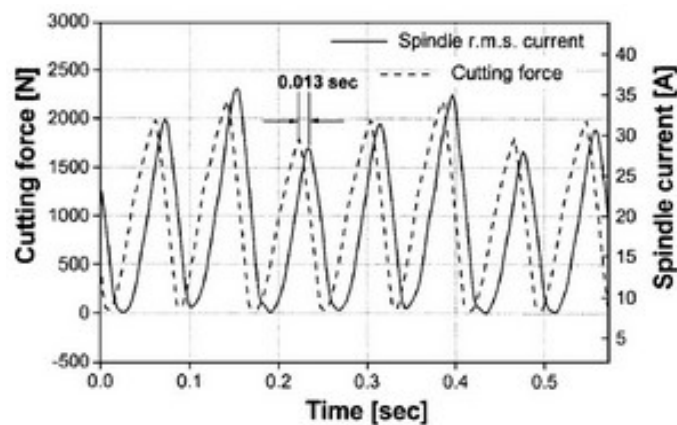


Figure 18. Retard du signal provenant de la broche [Kim01].

Pour des applications avec des outils rotatifs, comme le fraisage et le perçage, la mesure de la puissance consommée par un moteur est généralement plus facilement exploitable que la mesure directe d'effort. Les technologies de capteurs d'efforts sont moins adaptées et plus chères. Les capteurs à effet Hall sont placés dans l'armoire électrique, sur l'alimentation du moteur. Ils sont donc très faciles à installer, même sur une machine déjà présente dans l'atelier (en retrofit)

[Byr95]. Ils sont robustes car insensibles à la sévérité du milieu industriel. Ils sont situés en dehors de la zone de travail. De plus, leur prix est moins élevé que celui des capteurs d'efforts [Lee99]. Les capteurs de puissance représentent donc un très bon rapport qualité-prix. C'est pourquoi tous les fabricants de SSAU instrumentent généralement les centres d'usinage avec ce type de capteur. Certaines sociétés utilisent exclusivement ce type de capteur [Dig02][Oma03].

Dans le cas d'un moteur d'axe, la consigne d'avance n'est pas toujours atteinte et la vitesse ne cesse de varier, c'est fréquent pour le fraisage de pièces complexes. Le signal de puissance contient les quantités d'accélération, dues aux masses des tables en accélération/décélération, et les amortissements solides et visqueux dus au frottement dans les glissières. La valeur de l'amortissement fluctue sensiblement selon l'état de lubrification et la vitesse de translation de l'axe [Wec89]. Ces composantes du signal sont souvent plus importantes quantitativement que celles liées à la coupe. Il s'agit donc d'isoler la partie process du signal pour effectuer une surveillance d'usinage correcte. Selon une approche théorique, des modélisations de la boucle d'asservissement des axes de la CN sont proposées mais elles sont difficiles à construire et à renseigner du fait de la confidentialité imposée par les constructeurs. Des modèles sont proposés pour les moteurs à courant continu [Alt92] ou pour les moteurs synchrones [Kim96].

Selon une approche expérimentale, les universitaires d'Aix La Chapelle proposent d'identifier les quantités d'accélération et les amortissements lors de mouvements d'axes sans usinage. Le signal peut alors être traité : en enlevant ces caractéristiques qui ne sont pas liées à la coupe [Kae97]. Kim et al. ont choisi d'entraîner un réseau de neurones avec des mesures en parallèles de courants de moteurs d'axe, de vitesses d'avance et d'efforts correspondants, grâce à une table dynamométrique. Ensuite, pendant un suivi d'usinage, les efforts sont estimés à partir des courants et des vitesses d'avance. Ceci permet notamment d'éliminer le saut effectué par le courant lorsqu'un changement de direction est observé sur un axe [Kim99].

En somme, les transducteurs de puissance sont une solution pratique et bon marché permettant d'obtenir des informations sur l'usinage en cours. Néanmoins, la bande-passante est très limitée, si bien que seule la puissance moyenne consommée par la broche peut être traitée, lorsque des conditions de coupe industrielles sont utilisées.

2.3. Déplacements

Il s'agit de capteurs inductifs qui mesurent la distance à un matériau métallique. En fraisage, quelques recherches ont été menées en les plaçant près du corps de l'outil [Vaf02]. Il est possible de surveiller l'apparition de broutement. Récemment, La société Prometec et le centre de recherche WZL ont développé la bague 3SA (Spindle Sensor System and Analysis) afin de mesurer les déplacements du nez de la broche par rapport à son logement.

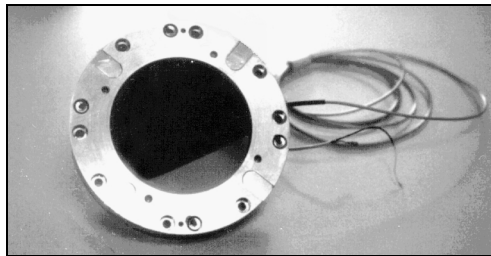


Figure 19. Bague 3SA [Pro03].

La bague 3SA comprend 2 capteurs de déplacement axiaux, diamétralement opposés, et 2 radiaux disposés à 90° (précision : 2 μm) ; les accélérations en 3D (bande-passante 10 kHz en radial et 1 kHz en axial), la température et la vitesse de rotation de la broche (une impulsion par tour) sont également mesurées [Klu03]. Ce jeu de capteurs de déplacement est également disponible sur une bague Fag (SpiCoM pour Spindle Condition Monitoring) avec 3 capteurs axiaux et 3 radiaux répartis à 120° (précision : 1 μm) ou bien les capteurs peuvent être directement intégrés dans une broche Weiss.

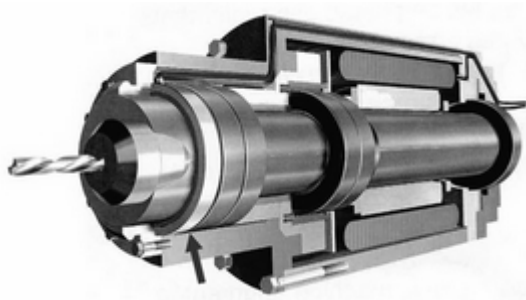


Figure 20. Bague SpiCoM (Fag).

Une telle bague permet une surveillance de l'état de la broche et notamment les problèmes vibratoires, de faux-rond, de déséquilibres ou d'endommagement des paliers [Pro03]. Cette bague pourrait être utilisée en tant que capteur d'efforts pour la surveillance d'usinage : détection de bris d'outil, d'usure, de surcharge, de broutement, de contact outil-pièce et de collision. Déplacement et effort sont des grandeurs liées entre elles par la raideur et, comme pour les capteurs piézoélectriques, le signal n'est pas retardé de plus d'1 ms. La flexion de l'ensemble outil/porte-outil/broche peut être mesurée et ainsi une correction de la position de l'outil par la

CN est envisageable [Klu03]. La précision géométrique des usinages s'en verrait améliorée. Comme la bague est placée à l'extrémité, elle n'affecte pas la rigidité de la broche. Seul le couple ne peut être mesuré. En fraisage la coupe est discontinue, ceci devrait être moins gênant qu'en perçage ou en taraudage, même avec de faibles efforts. Cette bague est à l'origine prévue pour diagnostiquer l'état de la broche, la signature de cette dernière sera identifiable et pourra être ensuite corrigée lors de l'usinage, comme certains chercheurs l'ont fait avec la bague d'efforts.

Albrecht, Park, Altintas et Pritschow ont utilisé des capteurs capacitifs pour mesurer les déplacements du nez de la broche. La bande-passante est alors plus faible (350 Hz), mais en compensant dynamiquement les 3 premiers modes de vibration de la broche (par un filtre de Kalman, dans le domaine fréquentiel), elle atteint 1000 Hz [Alb05].

Müller a également placé des capteurs inductifs à proximité des paliers, sur une broche à sustentation magnétique, Figure 21. Cette information lui permet de détecter endommagements de l'outil, usures et vibrations [Mul02].

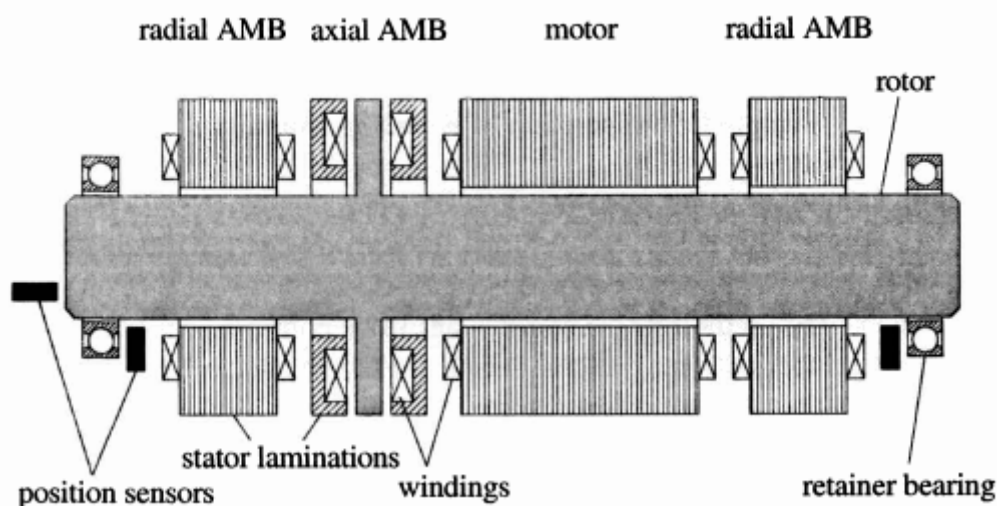


Figure 21. Capteurs inductifs placés à proximité des paliers magnétiques [Mul02].

Les capteurs inductifs, bons marchés et n'interférant pas avec l'espace de travail, semblent donc être une source d'information très complète, précise et rapide. Ce serait donc un bon candidat pour effectuer une surveillance d'usinage en fraisage par un suivi de la broche.

En fin de mémoire, nous reviendrons sur ces mesures de déplacements de rotor de broche afin de comparer nos résultats sur les mesures d'efforts avec cette nouvelle possibilité.

2.4. Vibrations

Pendant l'usinage, les efforts ne sont pas constants, surtout en fraisage de par la discontinuité de la coupe. Cette dynamique entraîne des vibrations basses fréquences de la structure de la machine, de la broche, de l'outil ou de la pièce. Le spectre de fréquences varie selon les process et les incidents qui surviennent, chacun ayant une signature particulière. Les vibrations sont mesurées par des accéléromètres (Figure 22), qui sont des quartz ou céramiques piézoélectriques, jusqu'à 150 Hz [Kut91]. Les capteurs sont de petite taille et peuvent aisément être installés à divers endroits de la machine (broche notamment). Ils sont robustes vis-à-vis de leur environnement (lubrifications, copeaux volants, ...). Les analyses sont essentiellement réalisées dans le domaine fréquentiel.



Figure 22. Capteur de vibrations 3D, Kistler.

Les capteurs sont généralement utilisés pour le diagnostic de machine-outil. Ils sont même placés de série chez certains fabricants de machine. Si un seuil d'alerte prédéfini est franchi, des vibrations importantes peuvent mettre en danger l'intégrité de la machine. Elle doit alors être stoppée. La broche, les déséquilibres et l'endommagement des roulements peuvent également être ainsi surveillés.

En surveillance d'usinage, ils sont souvent utilisés en perçage pour détecter le bris de forets de faible diamètre [El96] ; généralement en complément des signaux d'efforts sur les SSAU commerciaux. Ils permettent également une détection très rapide de collisions (en 0,1 ms [Mul02]) et leur domaine de prédilection est l'étude des vibrations pendant l'usinage. Ils sont plus rarement utilisés pour détecter des endommagements de fraises [Che99].

Le projet SIMON a développé une méthode de surveillance de l'usure en fraisage. Un coefficient particulier de la décomposition en ondelettes (cf. §3.2.2.c) des signaux des accéléromètres, est suivi [SIM02]. Il permet d'estimer l'usure d'outils boule de finition. Cette méthode a ensuite été commercialisée par Prometec. Parmi toute l'offre du marché en terme de SSAU, il s'agit là d'un des seuls systèmes commerciaux qui n'est pas basé sur le principe de l'apprentissage.

Facilement implantables dans la machine et notamment sur la broche, les accéléromètres fournissent une information riche dans le domaine fréquentiel, permettant de suivre l'usinage.

2.5. Emissions acoustiques

Les capteurs d'émissions acoustiques (EA) ont été également largement testés. Lors de la formation du copeau (entrée d'une dent dans la matière, frottements entre les dents et la matière, déformations plastiques dans la zone de cisaillement), lors de la fragmentation du copeau, de l'impact lors de sa retombée sur la pièce, mais également en cas de bris ; des ondes de contraintes élastiques sont générées et se propagent dans la machine, la pièce et l'outil [Mor83]. Ces ondes sont mesurées par des transducteurs piézo-électriques d'EA, placés à différents endroits de la machine (aussi près de la coupe que possible). Un jet de lubrifiant peut éventuellement être utilisé pour transmettre l'onde entre le capteur et l'outil ou la pièce (Figure 4 – cependant le passage d'un copeau devant le jet est très gênant). Les capteurs d'EA sont les plus sensibles de ceux utilisés pour suivre l'usinage ; en contrepartie, des événements bénins comme la retombée des copeaux sur la pièce, peuvent fortement perturber les analyses et causer des alarmes intempestives [Byr95].

Le traitement de signaux d'EA est souvent effectué à partir de la valeur efficace (RMS). Dornfeld a réalisé de nombreux travaux de surveillance d'usinage à partir des EA : en tournage, fraisage, perçage, rectification, usinage de précision et polissage mécano-chimique [Dor03]. Ces capteurs sont généralement utilisés pour détecter l'usure et l'endommagement de l'outil, dans les procédés où la coupe est continue : tournage et perçage.

2.6. Température

Avec l'accroissement de l'usure en dépouille, la zone de contact et donc le frottement entre l'outil et la pièce augmente. Ainsi, davantage de chaleur est générée au niveau de l'arête de coupe. Il est possible de la mesurer par une caméra infrarouge. Une nouvelle alternative a été développée par Actarus. Elle consiste à intégrer des sondes thermiques dans les plaquettes et ainsi effectuer une mesure au plus près de la coupe. Depuis peu, cela est possible en fraisage, mais seulement pour l'expérimentation.

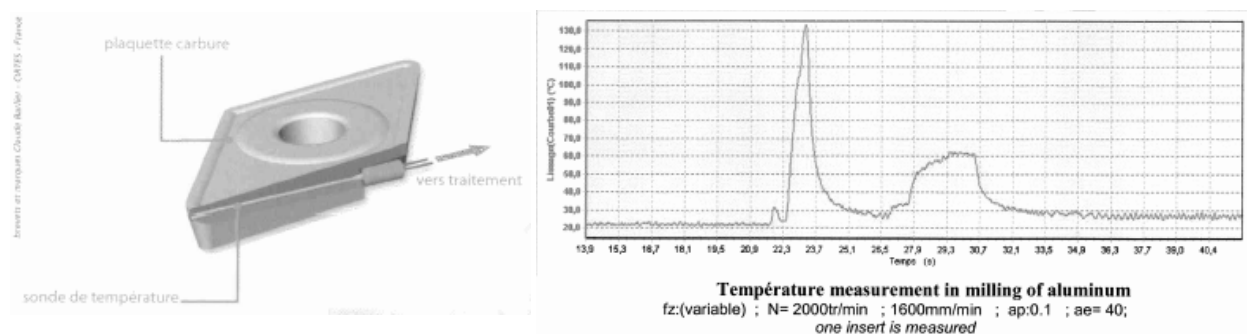


Figure 23. Sonde de température intégrée à la plaquette et ses mesures pendant un essai de coupe, ACTARUS.

Les essais de coupe réalisés par Actarus (à droite de la Figure 23) montrent que le temps de réaction est très lent (1 s environ). De plus, le prix de plaquette est au moins multiplié par 10. Ces techniques ne sont donc pas applicables en SU industriellement mais permettent d'étudier la réalisation d'une pièce sous un angle différent de celui des actions mécaniques. Dans le cadre d'expérimentations (et non de production), cela peut servir à une meilleure compréhension et aider au réglage optimal des paramètres opératoires [Lah06] [Bat05].

2.7. Sans ajout de capteurs

Il est possible d'obtenir des informations sur l'usinage sans ajouter de capteurs dans la MOCN.

2.7.1. Informations de la Commande Numérique

Certaines CN de nouvelles générations permettent d'effectuer des mesures pendant l'usinage, comme la Siemens 840D. Keaver, Platen et Weck ont montré la faisabilité de cette approche au cours du projet SIMON [Kae99]. Il est notamment possible de mesurer les positions des axes, les vitesses d'avance, les puissances consommées par les moteurs d'axes et de broche. Cette information est donc « gratuite » car elle ne nécessite aucune installation supplémentaire. Néanmoins, la période d'échantillonnage est limitée à celle de la CN (au mieux 2 ms). Ainsi, seules des valeurs moyennes peuvent être relevées au cours de l'usinage. Elles peuvent être utilisées pour effectuer de la commande adaptative ou une surveillance de l'usinage.

2.7.2. Informations des broches à paliers magnétiques

IBAG et S2M proposent des broches de nouvelles générations fonctionnant sans contact entre le moyeu et le logement : par sustentation magnétique. Elles permettent d'atteindre jusqu'à 70 kW à 30 000 tr/min. L'axe de la broche est maintenu en équilibre par la boucle d'asservissement présentée Figure 24. Si une charge déplace la broche d'un côté, les courants de commande des paliers magnétiques vont alors compenser ce déplacement.

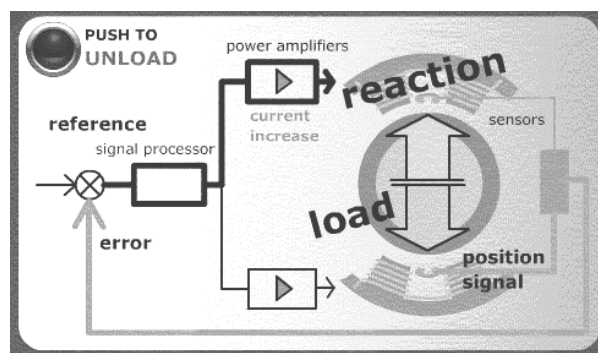


Figure 24. Principe de fonctionnement de l'asservissement de la position des broches à paliers magnétiques (S2M).

Auchet et al. proposent de mesurer indirectement les efforts de coupe par l'intermédiaire de cette tension de commande [Auc04]. Ils semblent alors trouver une bande-passante de 4 kHz. A contrario, Müller affirme que ces tensions ne sont pas exploitables (hormis pour obtenir les efforts moyens) puisque ces courants de commande représentent la réponse du contrôleur à un déplacement de l'axe et non réellement les efforts de coupe [Mul02]. C'est pourquoi ce dernier n'utilise que les signaux des inductifs (servant à l'asservissement de la position de la broche) pour effectuer ses travaux.

2.8. Synthèse

Nous venons d'étudier l'offre disponible en terme de capteurs pouvant être utilisés pour suivre la production.

La puissance semblait particulièrement intéressante pour surveiller les opérations de fraisage (procédé auquel notre travail est consacré). Malgré son utilisation généralisée sur la quasi-totalité des SSAU commerciaux voués au fraisage, sa bande-passante semble très limitée. Nous étudierons néanmoins quelles informations sont présentes dans les signaux de puissance au dernier chapitre de ce manuscrit.

Les capteurs de déplacements de type inductif semblent très prometteurs ; des expérimentations seront donc menées avec ces derniers.

Mais dans un premier temps, afin de tester plusieurs méthodes de surveillance d'usinage, une table dynamométrique sera utilisée. En effet, elle reste un moyen de mesure très précis avec une bande-passante suffisamment large. C'est pourquoi elle sert de référence à la majeure partie des travaux de recherche. Elle nous permettra de développer notre propre méthode de surveillance d'usinage et de la valider par des expérimentations.

Ensuite, comme une table dynamométrique ne peut être appliquée industriellement, nous lui chercherons une alternative, dans un second temps.

3. Méthodes de diagnostique

Nous venons de voir comment il est possible d'instrumenter la machine afin d'acquérir de l'information sur le déroulement de l'usinage. Nous avons également présenté le principe de fonctionnement des SSAU commerciaux ainsi que leur principale limite qui est de ne pouvoir être appliquée à la production de pièces unitaires et de lots de petite et moyenne taille ; à cause de l'apprentissage. Ainsi, l'objectif de nos travaux est de développer une solution permettant une surveillance fiable des productions flexibles. En effet, il n'existe pas de solution fiable et efficace, qui soit viable industriellement, pour ce type de productions [Klo99].

Nous allons maintenant traiter des différentes techniques proposées dans la littérature, qui permettent d'analyser les signaux mesurés et d'établir un diagnostic sur le bon déroulement ou non de l'usinage. Nous chercherons à identifier les méthodes qui nous semblent les plus pertinentes afin de répondre à notre problématique.

Comme nous l'avons vu précédemment, la surveillance d'usinage est un élément clé permettant de sécuriser le système de production, garantir la qualité des pièces, atteindre une meilleure productivité et permettre un plus haut degré d'automatisation du processus de fabrication. C'est pourquoi une abondante littérature traite de ce domaine depuis plus de 20 ans. Des très bons articles de synthèse, comprenant généralement de 70 à 200 références, présentent l'ensemble des approches proposées pour le fraisage : [Ton88], [Byr95] La référence, [Jem95], [Pri99] très pédagogique, [Cho99b] spécifique aux travaux coréens, [Dim00] pour l'usure, [Lia02] SU et contrôle du process, [Mon02] pour l'intelligence artificielle, et enfin [Reh04] qui est plus récent, très complet et où les approches sont classées par procédé. Nous présenterons donc ces approches de manière synthétique dans cette partie. Nous identifierons ainsi plus distinctement les voies les plus aptes à répondre au manque de solution de SSAU pour la production flexible par fraisage.

Nous avons proposé la classification qui est présentée Figure 25. Elle nous servira de fil conducteur.

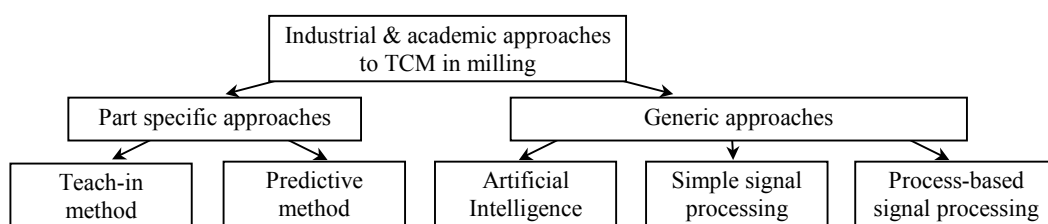


Figure 25. Les différentes approches possibles de la surveillance d'usinage [Rit06a].

3.1. Approches spécifiques à une pièce

Il s'agit là de méthodes qui vont s'attacher à l'usinage d'une pièce en particulier. Ainsi, sa géométrie, les trajectoires d'usinage, les conditions de coupe, les outils (, ...) vont être pris en compte.

3.1.1. Apprentissage

Nous avons déjà spécifié toute la problématique de l'apprentissage au paragraphe 1.5. Cette approche est proposée par la majeure partie des systèmes industriels mais elle ne permet pas de répondre à notre problématique.

3.1.2. Méthodes prédictives

Le principal problème de la méthode par apprentissage, est l'obtention de la courbe d'apprentissage. Cette dernière représente l'évolution de la grandeur physique suivie (par exemple les efforts) au cours de l'usinage de la pièce et en fonction du temps. Des universitaires ont donc proposé de renseigner cette courbe d'apprentissage par des simulations numériques [Ber83] [Sat00]. Ceci permet d'effectuer la surveillance d'usinage dès la réalisation de la première pièce. C'est donc une solution possible pour résoudre notre problématique.

La pertinence de la méthode repose alors sur la précision du modèle d'effort de coupe et sur la qualité de l'identification de ses paramètres. Or, jusqu'à présent, les travaux menés sont basés sur les efforts moyens (par tour de broche) et les prédictions sont peu précises. Les écarts entre les prédictions et le réel peuvent atteindre 90%, principalement lorsque les conditions de coupe varient. Ce n'est donc pas suffisant pour permettre une S.U. fiable et efficace. En outre, en fraisage il est admis que si une dent est endommagée, la dent suivante devra effectuer un travail supplémentaire pour enlever le surplus de matière [Pri99]. Or, les efforts moyens ne permettent pas de traduire cette propriété et il faudrait étudier plus précisément ce qui se passe à chaque passage de dent (plutôt qu'à chaque tour de broche).

Le concept de remplacer la courbe d'apprentissage par une prédiction, reste néanmoins intéressant et mériterait d'être approfondi avec un modèle d'efforts de coupe plus précis et mieux étalonné. En outre, il convient également d'être en mesure de prédire les valeurs réelles de l'avance et de l'engagement de l'outil, à chaque instant au cours de l'usinage ; sinon les écarts entre le prédictif et le réel seront importants.

3.2. Approches génériques

Plutôt que de d'essayer de surveiller l'usinage d'une pièce spécifique, il s'agit là de reconnaître dans les signaux d'efforts (par exemple), la signature particulière d'un événement. Par exemple, pour une collision ou un endommagement important de l'outil (comme sur la Figure 5), la signature recherchée sera une brusque hausse des efforts. Il s'agit donc de méthodes génériques, pouvant être appliquée à n'importe quelle configuration d'usinage. Il est ainsi possible de surveiller l'usinage dès la première pièce et ainsi répondre à notre problématique.

3.2.1. Intelligence Artificielle

De nombreuses études traitent d'Intelligence Artificielle (IA). Il peut s'agir de réseaux de neurones, de logique floue ou d'un système hybride combinant leurs avantages respectifs ; ou encore des systèmes experts, des algorithmes génétiques, de la reconnaissance de forme et de la sélection négative. Ces approches donnent des résultats intéressants pour effectuer de la SU. Monostori décrit plus précisément les différentes voies qui ont été abordées [Mon02].

Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique, supervisées ou non. Différentes techniques existent mais ce processus peut s'avérer long et coûteux. En effet, des passes ou des pièces doivent être usinées. Il arrive qu'à faire apprendre un réseau de neurones toujours sur des échantillons similaires, celui-ci devienne inapte à reconnaître autre chose que les éléments présents dans l'échantillon. On parle alors de *surapprentissage* : le réseau est devenu trop spécialisé et ne *généralise* plus correctement. Ainsi, en dehors des conditions de coupe pour lesquelles le réseau a été entraîné, il n'est pas possible de garantir que le réseau de neurones va toujours être fiable.

Par exemple, si une variante de la pièce doit être usinée, l'utilisateur pourra être amené à devoir recommencer l'apprentissage pour pouvoir surveiller cette nouvelle pièce, comme c'est le cas dans [Tar96]. On peut également être amené à modifier la structure du réseau de neurones [Gar00]. En effet, pour limiter ce genre de problèmes, on doit veiller à utiliser un nombre adéquat de neurones et de couches cachées.

Ainsi, il ne semble pas possible de garantir que la surveillance va être fiable tout au long de l'usinage d'un moule, par exemple. Nous préférons donc écarter cette voie.

3.2.2. Traitement du signal

La forme ondulée des signaux d'efforts en fraisage, a logiquement amené bon nombre de chercheurs à appliquer les techniques de traitement du signal pour détecter des incidents.

a) Domaine temporel

Les méthodes statistiques sont très souvent utilisées (calcul de moyennes, variances, RMS, moyennes synchronisées [Li01] [Tze04]).

Plusieurs auteurs proposent d'appliquer des modèles Auto-Régressifs (AR). Il s'agit d'une méthode d'analyse des séries temporelles dont le principe est le suivant : Considérons qu'une opération de fraisage peut être représentée par un modèle déterministe d'une part, et par un modèle stochastique d'autre part. Le premier est basé sur les caractéristiques de la coupe en fraisage (nombre de dents, rotation de l'outil, ...). Il suppose que la forme des signaux ne va pas changer d'un tour de broche à l'autre et permet ainsi de prédire la forme qu'aura le signal au tour de broche suivant. Le second modèle représente tout le bruit du signal qui l'écarte du premier modèle. Ce bruit a plusieurs sources : comme par exemple la variabilité inhérente au processus de coupe, les vibrations, le bruitage des mesures... Un bris ou une usure sont également considérés comme stochastiques.

Les mesures effectuées lors d'un tour de broche sont donc utilisées pour prédire la partie déterministe du signal pour le tour de broche suivant. En répétant cela continuellement, un endommagement de l'outil devrait être détecté, puisque le résidu (c'est-à-dire la différence entre le signal réel et le signal prédit, pour un tour de broche donné) devrait dépasser un seuil de détection.

Dans l'ensemble, l'ordre des modèles AR est allé décroissant : Matsushima et Bertok proposèrent un modèle du 28^e ordre [Mat82] ; puis Tansel et McLaughlin passèrent à 20 et 24 [Tan93] ; 15 pour Lan et Nærheim [Lan86] ; Spiwak et Wu proposèrent un 2^e ordre [Spi88] ; enfin Altintas proposa un 1^{er} ordre [Alt88]. Avant les 1^{er} et 2^e ordres, les temps de calculs étaient beaucoup trop longs et donc incompatibles avec une surveillance d'usinage en temps réel [Pri99].

Lee et al. montrèrent ultérieurement que le modèle proposé par Altintas n'était pas suffisamment fiable (notamment lorsque le battement radial est important ou que les conditions de coupe varient) [Lee95].

b) Domaine fréquentiel

L'aspect temps réel de la SU a limité le nombre de travaux basés dans le domaine fréquentiel, jusqu'à assez récemment. Les transformées de Fourier rapides (*FFT*) étaient réservées à la détection de l'usure ou du broutement. Pour la détection d'endommagement de l'outil, l'idée générale consiste à étudier l'amplitude des composantes du signal (dans le domaine fréquentiel). Chen et Chen [Che99] a établi à partir d'un calcul théorique que, lorsqu'un outil en bon état, seule une composante est présente à la fréquence de passage des dents ; et que s'il est endommagé, des harmoniques de la fréquence de broche sont situées de part et d'autre de cette composante (à droite Figure 26). Or, en situation réelle, les dents ont du battement radial et ce dernier va générer ces harmoniques de la fréquence de broche, même si l'outil est neuf.

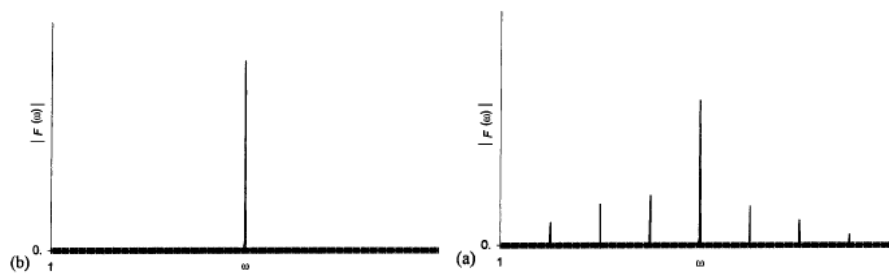


Figure 26. Analyse dans le domaine fréquentiel [Chen99].

C'est pourquoi Müller [Mul02] va plus loin et calcule les rapports entre les amplitudes de toutes les harmoniques de la fréquence de rotation de la broche. Tous les 10 tours, une nouvelle FFT est calculée et les nouveaux rapports sont comparés aux précédents. La méthode s'avère fiable si l'engagement radial est supérieur à 20%.

c) Ondelettes

Les transformées en ondelettes (*Wavelet Transform*) se développent de plus en plus (elles sont l'outil de compression utilisé par le format JPEG 2000). Il s'agit d'une décomposition du signal (en ondelettes) faisant apparaître à la fois des informations temporelles et fréquentielles. Elles s'adaptent à la caractéristique recherchée et permettent de suivre au cours du temps, une plage particulière du domaine fréquentiel. Elles permettent d'éliminer le bruit d'un signal. Enfin, contrairement à une FFT, elles permettent d'analyser des signaux non-stationnaires. Cette dernière propriété est particulièrement intéressante dans le cadre de la SU.

Kasashima et al. ont montré que, par une transformée en ondelettes, il est possible de séparer l'effet du battement radial des dents, de l'effet d'un écaillage [Kas95]. La confusion de ces 2 phénomènes provoque de nombreuses alarmes abusives pour bon nombre de méthodes. C'est donc là un résultat intéressant. A partir de l'étude de quelques cas particuliers, Lee et Tarn

proposent ensuite de suivre un coefficient A4 [Lee99] et Xu et al. préfèrent un coefficient D5 [Xu02]. Hormis le système de Prometec permettant de détecter l'usure (vu au 2.4), les méthodes de détection d'endommagement de l'outil basées sur les ondelettes n'ont pas encore été testées dans un cadre général, pour différentes configurations d'usinage pouvant être rencontrées au cours de l'usinage d'une pièce. Cette voie prometteuse mériterait donc d'être approfondie.

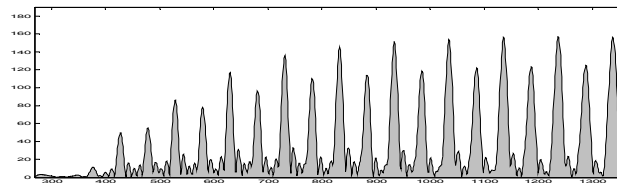


Figure 27. Efforts de coupe, lors d'une phase d'entrée en matière de l'outil (2 dents).

De nombreuses déclinaisons des techniques de traitement du signal sont ainsi proposées en surveillance d'usinage. Leur application directe à la surveillance d'usinage pose généralement des problèmes d'adaptation, face à la diversité des configurations d'usinage pouvant être rencontrée. Par exemple, lors d'une phase d'entrée en matière de l'outil (Figure 27), les dents vont enlever progressivement de plus en plus de matière. Ainsi, les signaux n'auront pas la forme ondulée et stationnaire, à partir de laquelle la méthode de traitement du signal a été développée. Le risque de détection abusive devient alors élevé.

Les méthodes de traitement du signal évoquées ici sont intéressantes mais il serait souhaitable qu'elles puissent mieux s'adapter aux différentes configurations d'usinage que peut présenter la réalisation d'une pièce en fraisage.

3.2.3. Analyse basée sur les caractéristiques du fraisage

Afin que le critère de SU puisse s'adapter à la diversité des configurations d'usinage alors rencontrées, plusieurs auteurs ont ainsi intégré les connaissances des caractéristiques de la coupe en fraisage, dans la définition de leur critère [Alt89] [Lee95] [Dey95] [Kim01].

En effet, d'une part, des paramètres géométriques, cinématiques et physiques de la coupe sont maîtrisés ou maîtrisables pendant l'usinage [Fur02]. D'autre part, des modélisations adéquates des actions mécaniques en fraisage ont été développées [Alt89]. Il est ainsi possible de prévoir l'évolution des signaux des efforts au cours de l'usinage d'une pièce. Le développement de nouveaux critères s'appuie alors sur une modélisation mécanique des efforts de coupe en fraisage. De part sa conception, le critère peut ainsi passer outre la majeure partie des configurations d'usinage, et se focaliser sur l'état de l'outil.

Cette approche nous semble être la plus appropriée à la surveillance de productions flexibles en fraisage ; car les critères sont en lien direct avec le process, ce qui leur permet de s'auto-adapter aux différentes configurations d'usinage. Nous retiendrons ainsi de cette étude bibliographique, qu'il semble important d'intégrer les connaissances des caractéristiques du fraisage lors du développement de nouveaux critères. Les critères proposés [Alt89] [Lee95] [Dey95] [Kim01], semblent alors particulièrement intéressants et nous allons approfondir leur étude dans le chapitre suivant.

3.3. Validation expérimentale

Les méthodes proposées ont pour objectif de surveiller l'usinage d'une pièce. Afin de juger de la pertinence d'une méthode, la validation expérimentale est donc un point important.

Au cours de l'étude bibliographique, nous avons remarqué que généralement peu d'expérimentations étaient menées, ou du moins présentées dans les publications. En outre, les critères de SU sont rarement testés dans des conditions de trajectoires et de coupe rencontrées industriellement lors de la réalisation de pièces.

En effet, les conditions de coupe sont souvent bien en deçà de la réalité en production. Ainsi, pour usiner des aciers au carbone ou des alliages d'aluminium, des vitesses de coupe de moins de 40 m/min sont souvent utilisées [Lee95] [Lee99] [Zhe99] [Kim99] [Jun99] [Cho00] [Che00] [Hua00] [Sat00] [Li01] [Sar01] [Lee02] [Xu02] [Alr03] [Chu03] [Lia03] [Ert03] [Rom03] [Ton03] [Sha04] [Son05] [Yes06].

Les résultats établis à partir de vitesses de coupe aussi faibles, peuvent s'avérer erronées dans les domaines de conditions de coupe utilisés industriellement. Par exemple, une méthode de SU basée sur les pics d'efforts générés au passage de chaque dent et appliquée aux signaux de puissance, peut être fiable en tournant très lentement. Mais si une vitesse plus conventionnelle est utilisée, la bande-passante des signaux de puissance sera trop limitée et l'information recherchée par le critère aura disparu. Par ailleurs, si la vitesse d'avance est faible, l'asservissement des axes de la machine sera moins sollicité et la consigne d'avance sera quasiment toujours respectée. Les variations importantes et brusques de l'avance, habituelles sur les machines UGV, ne seront pas rencontrées. Il n'y aura pas non plus ces variations dans les signaux d'efforts. Alors, le risque de détections abusives dues à une interprétation erronée des variations des efforts, est bien moindre. C'est pourquoi il est préférable de tester une méthode de SU dans les conditions où elle sera réellement appliquée.

Par ailleurs, les essais consistent généralement en l'usinage d'un faible nombre de passes rectilignes, pour quelques niveaux d'avance par exemple ; voire même le seul paramètre opératoire ayant changé est l'état de l'outil. Rares sont les auteurs à utiliser une pièce test [Tar96] [Sat00] [Kim01]. Or, pour tester si une méthode est applicable au suivi de production flexible par fraisage, ce n'est pas suffisant. Davantage de configurations d'usinage doivent être traitées, comme par exemple les phases où l'outil entre et sort de la matière, les franchissements de virages, ...

On peut donc constater dans l'ensemble un manque d'expérimentations dans des conditions de trajectoires et de coupe industrielles, de sorte à valider les méthodes de SU proposées. Il en est de même pour les 4 critères que nous venons de sélectionner au paragraphe précédent. Nous mènerons donc de plus amples expérimentations pour tester si les solutions proposées peuvent répondre au manque de SSAU pour les productions flexibles en fraisage.

4. Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord vu le principe de fonctionnement des Systèmes de Surveillance Automatique de l'Usinage proposés dans le commerce. Leur principale limitation est de ne pouvoir suivre l'usinage de pièces unitaires ou de lots de petite et moyenne taille ; à cause de l'apprentissage. Ce manuscrit sera donc consacré à l'élaboration d'une solution permettant une surveillance fiable et efficace de productions flexibles par fraisage.

Nous avons ensuite étudié les différents capteurs pouvant fournir l'information nécessaire à la surveillance de l'usinage. Les capteurs de déplacements de type inductif mesurant le rotor de la broche semblent être une solution prometteuse que nous testerons ultérieurement. Dans un premier temps, nous utiliserons la traditionnelle table dynamométrique afin de tester différents critères de la littérature, puis mettre en place et valider notre propre méthode.

L'étude bibliographique des différentes méthodes de SU proposées, nous a amené à sélectionner les critères basés sur les caractéristiques du fraisage. En effet, ils semblent particulièrement appropriés pour s'adapter aux différentes configurations d'usinage pouvant être rencontrées lors de l'usinage d'une pièce. Nous avons également constaté un manque d'expérimentations de ces critères dans des conditions de trajectoires et de coupe réellement industrielles. Au prochain chapitre, nous testerons donc en conditions réelles certains critères que nous avons retenus.

Chapitre II : Mise en œuvre de méthodes de Surveillance d'Usinage issues de la bibliographie

Au cours de l'étude bibliographique du chapitre précédent, nous avons identifié des critères de Surveillance d'Usinage qui intègrent les caractéristiques de la coupe en fraisage et qui semblent ainsi particulièrement adaptés pour répondre à notre problématique : le suivi de productions unitaires ou à faible cadencement en fraisage, à partir des efforts de coupe. Néanmoins, davantage d'expérimentations doivent être menées pour juger de la validité de ces critères lorsqu'ils sont appliqués dans des conditions industrielles.

Dans un premier temps, nous allons donc effectuer une étude analytique de ces critères, afin de déterminer ce qui pourrait perturber ces critères. Cela permettra de définir une pièce test plus pertinente. Ensuite, nous allons mener les expérimentations. Elles vont nous permettre d'appliquer les critères retenus dans des conditions de coupe et de trajectoires industrielles, ce qui n'avait pas été fait jusque là ; et ainsi d'identifier leurs possibles limitations. Nous pourrons alors caractériser les besoins qu'il reste à combler, concernant un système de Surveillance d'Usinage pour les productions flexibles en fraisage.

1. Expérimentations en conditions industrielles

1.1. Présentation des critères retenus

Les critères de SU que nous avons retenus, vérifient les 3 caractéristiques suivantes :

Tout d'abord, le critère proposé est conforme aux modèles mécaniques de la coupe en fraisage. Contrairement à une méthode classique de traitement du signal, le fait d'intégrer les caractéristiques de la coupe lors du développement d'une méthode de Surveillance d'Usinage, permet au critère de mieux s'adapter, par exemple, au cas de changement de conditions de

coupe. En fraisage, la coupe est discontinue et complexe. De ce fait, de nombreuses techniques permettant de détecter de faibles variations (ou détériorations) du processus en tournage ou en perçage s'avèreront inefficaces, voire inapplicables, en fraisage.

Afin de détecter un incident, les critères de Surveillance d'Usinage estiment l'état de l'outil à partir de la mesure d'une grandeur physique, telle que les efforts de coupe, lors de l'usinage. Les méthodes s'attachent à détecter un changement de l'état de l'outil. Plus précisément, elles se concentrent sur l'événement et cherchent à détecter l'instant où a lieu un incident. C'est la 2^e caractéristique.

Enfin, contrairement autres méthodes de SU où une valeur peut être calculée sur plusieurs tours de broche, ces critères prennent en compte le fait qu'une fraise possède plusieurs dents et que, pour détecter l'endommagement de l'une d'elles, il faut calculer une valeur correspondant à chaque passage de dent. Ainsi, contrairement aux procédés où la coupe est continue, il est particulièrement important en fraisage de surveiller chaque dent individuellement.

Quatre critères vérifiant ces trois caractéristiques ont été identifiées. Leur objectif est de détecter l'endommagement des dents de l'outil. Comme nous le verrons dans ce chapitre, les 2 principaux facteurs qui nuisent à la fiabilité de leurs détections sont : le battement radial des dents et les changements de conditions de coupe. Ces 4 critères sont présentés dans le Tableau 1. Comme nous allons le voir, certaines de leurs propriétés ont été validées (*tick*) ou infirmées (*croix*) dans de précédentes publications. L'objet de ce chapitre est de poursuivre ces investigations.

Critère de Surveillance d'Usinage	Permet la détection d'endommagements	Indépendant du battement radial	Indépendant des conditions de coupe
Altintas et al. [Alt89]	✓	x	x
Lee et al. [Lee95]	✓	✓	x
Kim et Chu [Kim01]	✓	✓	??
Deyuan et al. [Dey95]	✓	✓	??

Tableau 1. Synthèse des propriétés des critères de Surveillance d'Usinage qui intègrent les caractéristiques du fraisage.

Les premiers à proposer un critère vérifiant nos 3 caractéristiques, furent Altintas et Yellowley [Alt89]. A chaque tour de broche et au passage de chaque dent, ils calculent les différences 1^{ère} et 2^{nde} des efforts de coupe entre dents adjacentes. La périodicité des efforts de coupe en fraisage est utilisée : pendant chaque période de passage de dent T_c , la moyenne des efforts en X et en Y

est calculée (respectivement \bar{F}_x et \bar{F}_y). Puis la «quasi moyenne de la résultante des efforts de coupe» F_a est obtenue pour chaque passage de dent t :

$$F_a(t) = \sqrt{\bar{F}_x^2 + \bar{F}_y^2} \quad 4$$

Lorsque les conditions de coupe sont stables, une dent va toujours enlever le même volume de matière et donc générer le même $F_a(t)$. Par contre, suite au bris ou à l'écaillage de la dent, elle va enlever un volume de matière plus faible et donc générer des efforts plus faibles, la dent suivante effectuant, quant à elle, un travail supplémentaire. Les auteurs [Alt89] proposent donc d'étudier les différences premières pour détecter les bris :

$$\Delta F_a(t) = F_a(t) - F_a(t-1) \quad 5$$

Néanmoins ces différences premières sont sensibles aux changements de conditions de coupe tels que les phases de l'entrée en matière. Ces zones sont écartées si les différences premières et secondes ne vérifient pas l'inéquation 7 :

$$\Delta^2 F_a(t) = \Delta F_a(t) - \Delta F_a(t-1) \quad 6$$

$$|\Delta^2 F_a(t)| < |\Delta F_a(t-1)| \quad 7$$

Ensuite, un seuil de détection de bris adaptatif est calculé à chaque instant à partir d'une estimation de l'engagement radial de l'outil. Cette estimation \tilde{a}_e est obtenue à partir des efforts de coupe et d'une formule basée sur une modélisation de la coupe. Les coefficients de l'équation 8, proposés par les auteurs [Alt89], sont obtenus par simulation numérique. Lors de l'usinage, les variations relatives de F_a sont comparées à chaque instant à ce seuil afin de détecter d'éventuels incidents.

$$Seuil_{bris} = (2.125 \tilde{a}_e - 1.97) \times 100\% \quad 8$$

Cette méthode présente plusieurs points très intéressants :

- Tout d'abord, remarquons sa simplicité : les auteurs ont effectué une étude basée sur une modélisation des efforts de coupe qui a débouché sur la proposition de critères très simples à calculer et donc à mettre en œuvre dans un système temps réel. Ils n'en sont pas moins pertinents du fait de l'analyse des caractéristiques de la coupe menée en amont.
- Une valeur est extraite des efforts de coupe pour chaque dent, ce qui permet de détecter des détériorations plus fines de l'outil et ainsi pouvoir réagir avant que toutes les dents ne soient cassées.

- Il est précisé qu'afin d'effectuer une surveillance d'usinage fiable, il est nécessaire de distinguer l'effet du battement radial des dents ou de changements de conditions de coupe, de l'effet d'un bris.
- Les auteurs proposent également l'utilisation d'un seuil adaptatif. En effet, selon les conditions de coupe, l'estimation d'un même état de l'outil peut varier. Il faut alors adapter le seuil de détection afin que la méthode reste fiable et précise.
- D'un point de vue expérimental, les acquisitions d'efforts sont synchronisées sur les positions de la broche. Cette approche multi-capteurs intègre un codeur de broche. Le résultat est que les problèmes d'asservissement de la broche sont écartés et la méthode n'en est que plus fiable.

Néanmoins, cette méthode reste très sensible au battement radial des dents et sera peu performante si le battement est important. En effet, le principe de la méthode est que si une dent enlève plus de matière que les autres, cela signifie que la précédente est endommagée. Or, en cas de battement radial important (0,05 mm par exemple, pour la 2^e des 3 dents de la Figure 28), les écarts entre les efforts générés par chaque dent (différences premières) sont importants même avec un outil neuf. Pour être détecté, un incident doit donc provoquer des écarts encore plus importants. Par conséquent, cette méthode de surveillance d'usinage est peu précise.

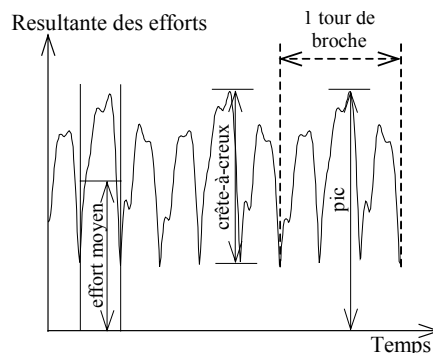


Figure 28. Différentes valeurs extraites des efforts de coupe au passage d'une dent.

Auparavant, Altintas [Alt88] avait proposé d'appliquer un modèle Auto-Régressif d'ordre 1 (coefficient \hat{a}) aux différences premières ΔF_a et de suivre ensuite le résidu w (erreurs de prédiction, cf. Chapitre I - §3.2.2.a) :

$$w(t) = \Delta F_a(t) - \hat{a}(t-1) \cdot \Delta F_a(t-1) \quad 9$$

Le principe de la méthode reste le même ; les défauts sont donc identiques. La méthode est donc peu fiable en présence de battement radial important sur l'outil car son principe ne permet pas de faire la différence entre l'effet d'un bris de plaquette et celui du battement [Lee94]. C'est

pourquoi Lee Choi Kim et Chu [Lee94] rajoutèrent un second critère, le *CISI Cutter Insert Self-comparing Index*, qui scrute les variations relatives des efforts générés par une même dent :

$$CISI(t) = \frac{F_a(t) - F_a(t - Z)}{F_a(t - Z)} \quad 10$$

Se focalisant sur une seule dent, ce critère est donc indépendant du battement radial. Ainsi la combinaison de ces 2 critères (w et *CISI*) permet d'effectuer une détection de bris plus fiable et de résoudre le problème dû au battement radial.

Nous retiendrons surtout l'idée de surveiller chaque dent individuellement. En effet, une fraise possède un nombre de dents donné et cette caractéristique doit être prise en compte. Ainsi, pour effectuer un suivi correct de l'usinage à partir de la Figure 28, il ne faut pas voir que 9 copeaux ont été enlevés, mais que pendant 3 tours de broches, les 3 dents de l'outil ont travaillé successivement, avec chacune leurs propres caractéristiques (battement, acuité,...).

Néanmoins, Kim et Chu [Kim01] ont montré par des simulations numériques que ces critères (w et *CISI*) sont perturbés par les changements de conditions de coupe. Ainsi, des bris d'outil et des changements de conditions de coupe ne peuvent être distingués de façon fiable. La méthode n'est donc pas fiable et doit donc encore être améliorée. C'est pour cela que Kim et Chu proposent le *TFI, Tool Failure Index*. Cette fois-ci, c'est la valeur de crête-à-creux $PV_j(n)$ qui est extraite de la résultante des efforts de coupe à chaque passage de la dent j , au tour de broche n . Le rapport de PV_j entre dents adjacentes est calculé. Si une dent est endommagée, la signature de l'outil va changer et ce ratio va varier, permettant la détection. Il est ensuite divisé par le ratio de leurs moyennes $\overline{PV_j}$ sur les 10 derniers tours de broche ($n-10$ à $n-1$) ; ce ratio de moyennes va ôter la signature de l'outil due au battement radial et devrait s'adapter aux changements de conditions de coupe qui ne sont pas trop rapides.

$$TFI_j(n) = \frac{\frac{PV_j(n)}{PV_{j-1}(n)}}{\frac{\overline{PV_j}}{\overline{PV_{j-1}}}} \quad 11$$

Ainsi, le *TFI* vaut environ un, lorsque la coupe est stable. Les effets du battement radial et des changements de conditions de coupe étant a priori supprimés, seul un incident doit faire varier le critère. C'est ce que les simulations numériques effectuées par Kim et Chu ont montré. Les efforts (en haut sur la Figure 29) ont été générés pour un outil possédant du battement radial ; et pour 4 jeux de conditions de coupe successifs, avant qu'un bris se soit simulé au 68^e tour de broche. Le *TFI* (en bas) l'a bien détecté. Notons que 10 tours après un incident, le critère vaut un à nouveau. Il est donc impératif d'interpréter correctement les variations du critère afin de pouvoir détecter l'instant où un incident a eu lieu, car ultérieurement cela ne sera plus possible.

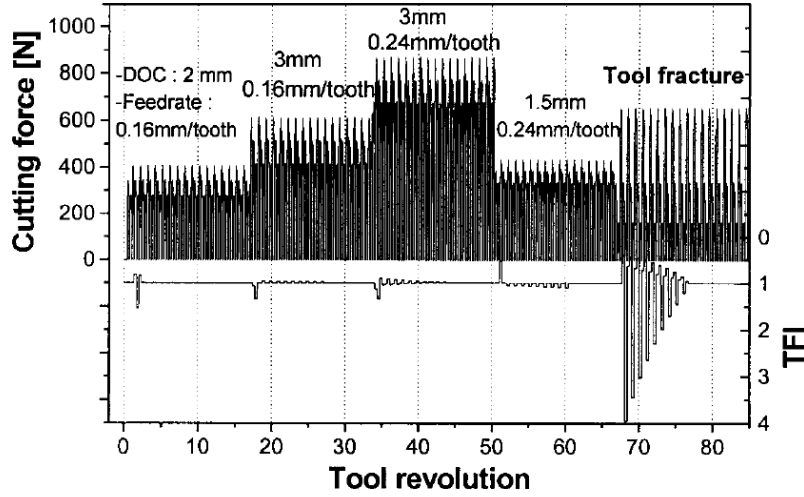


Figure 29. Simulations d'efforts de coupe et du TFI [Kim01].

Deyuan et al. [Dey95] ont également proposé deux critères, calculés à partir des pics d'efforts F_j générés au passage de la dent j . $\overline{F_k}(n)$ représente ici la moyenne des pics pour un même tour de broche n .

Le taux de pics (*peak rate*) est défini par :

$$Km_j(n) = \frac{F_j(n) - F_{j-1}(n)}{F_j(n) + F_{j-1}(n)} \quad 12$$

Le taux de battement relatif (*relative eccentricity rate*) est fixé à zéro pour la dent 1. Pour les autres dents, il est donné par :

$$Bm_j(n) = \sum_{k=2}^Z \left(\frac{F_k(n)}{\overline{F_k}(n)} - 1 \right) \quad 13$$

Les auteurs suggèrent que ces critères sont indépendants des conditions de coupe. Ils semblent donc prometteurs également. *TFI* [Kim01], *Km* et *Bm* [Dey95] n'ont été expérimentés que sur de simples passes rectilignes. Nous allons donc retenir ces 3 critères afin d'approfondir leur étude et poursuivre leur confrontation à des expérimentations correspondant davantage aux situations pouvant être rencontrées dans un contexte industriel.

1.2. Etude analytique

Avant de confronter les 3 critères retenus à de nouvelles expérimentations, il est nécessaire d'en approfondir l'étude afin de déterminer quels facteurs seraient susceptibles de faire varier ces critères et d'en perturber la performance ou la robustesse. Ces critères sont calculés à partir des valeurs de crête-à-croix PV_j et de pics F_j de la résultante des efforts de coupe, correspondant au passage des dents lorsque celles-ci usinent. Nous allons donc étudier ce qui, lors de changements

de conditions de coupe, pourrait affecter ces valeurs d'efforts et ainsi perturber les critères retenus. Pour cela, une modélisation classique des efforts de coupe a été utilisée [Sab60].

$$\begin{cases} F_t(\varphi) = k_t \cdot h_c(\varphi) \cdot a_p \\ F_r(\varphi) = k_r \cdot F_t(\varphi) \end{cases} \quad 14$$

où a_p est la profondeur de passe, k_t k_r des coefficients spécifiques de coupe et $h_c(\varphi)$ l'épaisseur de copeau instantanée. En effet, en fraisage, l'épaisseur de copeau varie en fonction de la position angulaire φ de l'outil.

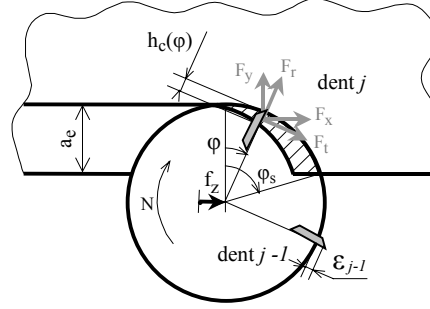


Figure 30. Epaisseur de copeaux et efforts de coupe, en fraisage.

En présence de battement radial des dents et de faux-rond de l'ensemble { moyeu de broche + corps d'outil }, le rayon réel (entre l'axe de rotation de l'outil et l'extrémité de chaque dent) diffère du rayon nominal d'une excentrication ε_j , comme indiqué Figure 30. L'épaisseur de copeau enlevée par chaque dent j est alors donnée par [Kli83],

$$h_{c_j}(\varphi) = f_z \cdot \sin \varphi + \varepsilon_j - \varepsilon_{j-1} = h_c(\varphi) + \Delta \varepsilon_j \quad 15$$

où f_z est l'avance par dent. Ainsi le volume de matière enlevé par chaque dent dépend de l'épaisseur de copeau nominale $h_c(\varphi)$ et du battement radial relatif $\Delta \varepsilon_j$. Précisons que si l'épaisseur de copeau calculée par l'équation précédente est négative, aucune matière ne serait enlevée et donc aucun effort généré. On impose alors $h_{c_j}(\varphi) = 0$.

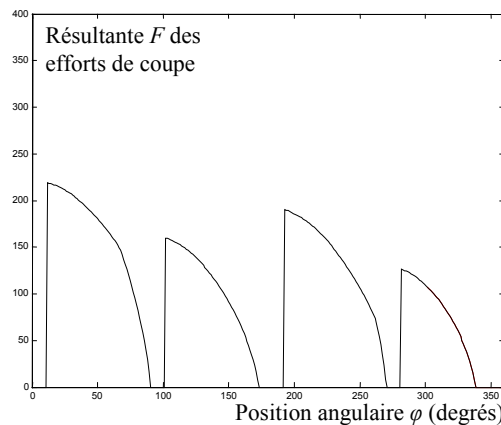


Figure 31. Résultante des efforts, simulée en considérant le battement radial (outil à 4 dents).

Sous l'hypothèse que pas plus d'une dent n'est engagée simultanément dans la matière (les autres cas sont abordés au chapitre IV), la résultante des efforts de coupe F est alors obtenue à partir des efforts tangentiels et radiaux générés par une seule dent j :

$$F(\varphi) = \sqrt{F_t^2(\varphi) + F_r^2(\varphi)} \quad 16$$

$$F_j(\varphi) = k_t \sqrt{1 + k_r^2} \cdot a_p \cdot h_{c_j}(\varphi) = K \cdot a_p \cdot [h_c(\varphi) + \Delta \varepsilon_j] \quad 17$$

où K est un coefficient spécifique de coupe, supposé constant. Si pas plus d'une dent n'est engagée simultanément dans la matière, il existe un instant où la résultante des efforts de coupe est nulle, juste après le passage de la dent (voir Figure 31). La valeur minimale des efforts, sur une période de passage de dent, est donc zéro. Ainsi, sur de mêmes périodes, les valeurs de crêtes-à-creux sont par définition égales aux valeurs des pics d'effort. Si h_c est l'épaisseur de copeau maximale, ces valeurs sont alors :

$$F_j(n) = PV_j(n) = K \cdot a_p \cdot (h_c(n) + \Delta \varepsilon_j) \quad 18$$

Une **formulation équivalente des 3 critères retenus** est alors obtenue, en fonction de conditions de coupe et des caractéristiques de l'outil :

$$TFI_j(n) = \frac{h_c(n) + \Delta \varepsilon_j}{h_c(n) + \Delta \varepsilon_{j-1}} \left/ \frac{\overline{h_c + \Delta \varepsilon_j}}{\overline{h_c + \Delta \varepsilon_{j-1}}} \right. \quad 19$$

$$Km_j(n) = \frac{\Delta \varepsilon_j - \Delta \varepsilon_{j-1}}{2 \cdot h_c(n) + \Delta \varepsilon_j + \Delta \varepsilon_{j-1}} \quad 20$$

$$Bm_j(n) = \frac{\varepsilon_j}{h_c(n)} \quad 21$$

Tout d'abord, on peut remarquer que si la coupe est stable, les valeurs des critères (pour une dent donnée) ne varieront pas. En effet, le battement radial des dents, inhérent au fraisage, a été intégré lors du développement des critères. Certes les valeurs des critères seront différentes d'une dent à l'autre, néanmoins elles seront stables une fois chaque dent considérée individuellement.

En outre, en cas de bris ou d'écaillage de la dent j , cette dent enlève moins de matière. Au vu de la modélisation retenue, ceci correspond à une excentration de la dent ε_j plus faible. Pour le TFI [Kim01], le dénominateur est un terme moyenné sur les 10 derniers tours de broche, il resterait donc constant et seul le terme de battement relatif de la dent endommagée $\Delta \varepsilon_j$ (situé au numérateur) varierait. Le TFI prendrait alors une valeur différente, ce qui permettrait de détecter l'incident.

De la même façon, un incident ferait varier Km et Bm , permettant sa détection. Dans le cas particulier d'un outil à 2 dents, on peut remarquer que l'équation 20 se simplifie et on obtient alors $Km=Bm$. Dans ce cas, les 2 critères proposés par Deyuan et al. [Dey95] sont identiques. Par ailleurs, les auteurs proposent des seuils de détection arbitrairement fixés à $\pm 0,8$ pour leurs 2 critères. Si la valeur d'un critère sort de cet intervalle lors d'un usinage, le système de surveillance d'usinage détecte l'occurrence d'un bris. Ces seuils sont dépassés si un pic d'effort est trop important par rapport à celui de la dent précédente. Il est aisé de calculer à quoi correspondent ces niveaux de seuils. Pour le taux de pics Km , on obtient $F_j > 9.F_{j-1}$. Pour le taux de battement relatif Bm , cela dépend du nombre de dents de l'outil : pour un outil à 2 dents, une alarme est déclenchée si $F_j > 9.F_{j-1}$; si $F_j > 3.F_{j-1}$ pour un outil à 3 dents, ... En terme de conditions de coupe, le taux de battement relatif Bm détecte un bris si le battement **simple** d'une dent atteint 80% de l'épaisseur de copeau nominale (équation 21). Ce peut être un bris endommageant la dent sur 80% de l'épaisseur de copeau. Cependant, une telle valeur peut également être atteinte si, pour un outil donné et donc pour un battement donné, ce dernier atteint réellement 80% de l'épaisseur de copeau nominale : ce cas de figure peut tout à fait se rencontrer si l'épaisseur de copeau est faible, comme par exemple lorsque l'avance chute fortement lors d'un virage ou lorsque l'engagement radial est faible comme en finition. Il semble donc dangereux de fixer arbitrairement le niveau d'un seuil et préférable d'adapter celui-ci, aux conditions de coupe par exemple. On parle alors de seuil adaptatif. C'est plutôt cette voie qu'ont choisie les concepteurs du *TFI* : ils suggèrent d'adapter le niveau du seuil en fonction d'une estimation de l'engagement radial et du niveau de bris que l'on souhaite arriver à détecter (exprimé sous forme d'un pourcentage de l'avance à la dent).

Au vu des équations 19 à 21, les critères sont a priori indépendants du couple outil matière et de la profondeur de passe. Cette dernière peut donc varier au cours de l'usinage, la détection de bris n'en sera pas affectée. Par contre, ces mêmes équations nous montrent également que la formulation équivalente des 3 critères est fonction de l'épaisseur de copeau. Par conséquent, si au cours de l'usinage, la vitesse d'avance ou l'engagement radial varient, les valeurs des critères devraient également varier. Or ces critères ont pour but d'estimer l'état de l'outil et ne doivent varier qu'en cas d'incident. Ainsi, les critères ne seraient pas indépendants des conditions de coupe, contrairement à ce que suggèrent leurs concepteurs [Kim01][Dey95]. Si tel est le cas, cela engendrerait une confusion : si, lors de l'usinage d'une pièce, des variations des critères sont observées, ces variations sont-elles dues à un réel incident ou à d'anodines variations de l'avance par exemple ? Cela pourrait fortement nuire à la fiabilité des détections de bris de plaquettes. C'est pourquoi nous allons mettre en place des expérimentations afin de mettre en œuvre ces

critères. Nous pourrions ainsi déterminer si ces critères permettent des détections de bris fiables, malgré une possible sensibilité aux conditions de coupe.

Il ressort de cette étude analytique que les paramètres opératoires pouvant le plus perturber les critères retenus, sont l'avance à la dent et l'engagement radial de l'outil. Nous allons donc tout d'abord définir une pièce test où ces 2 paramètres opératoires vont varier au cours de l'usinage, comme c'est le cas lors de la plupart des opérations de fraisage industrielles.

1.3. Définition d'une pièce test

Dans bon nombre de travaux, les critères de surveillance d'usinage proposés ne sont testés que sur de simples passes d'usinage rectilignes. Les conditions de coupes sont alors stables et ces expérimentations ne permettent pas de juger de la validité de la méthode de S.U. proposée, pour l'usinage d'une pièce industrielle. Nous allons donc proposer une pièce test ainsi que les trajectoires permettant sa réalisation, qui nous permettra de juger de la validité des 3 critères retenus. Plus particulièrement, nous allons vérifier si ces critères permettent une surveillance fiable malgré des changements de conditions de coupe. Nous avons vu précédemment que des variations de l'avance et l'engagement radial pourrait les perturber. Nous allons donc nous concentrer sur ces deux paramètres opératoires et leur évolution lors des opérations de fraisage courantes. C'est pourquoi nous allons considérer des opérations d'usinage de type 2 ½ axes.

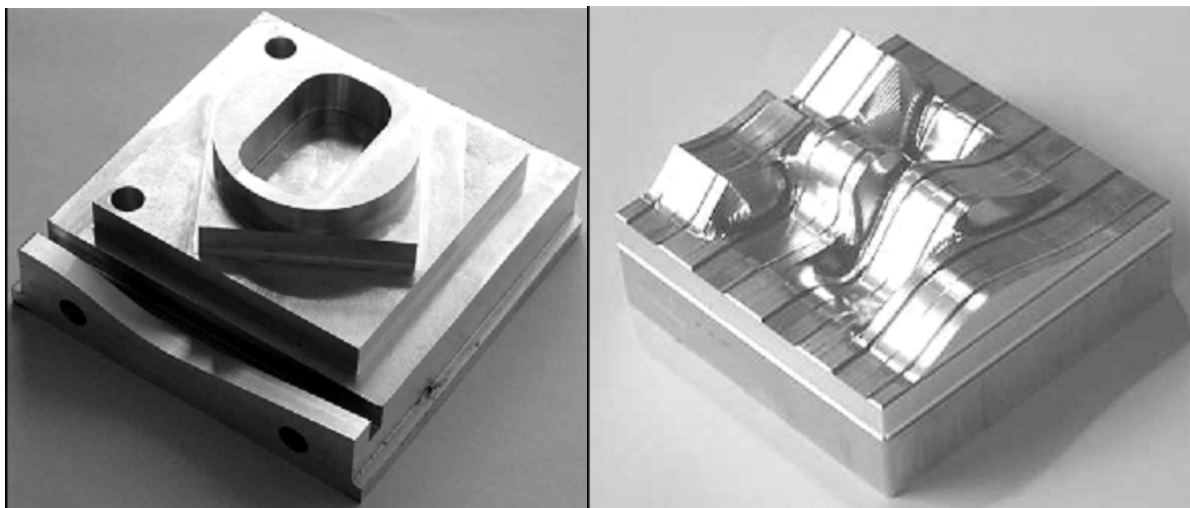


Figure 32. Exemples de pièces tests ([Ter05] à gauche, [Dug02] à droite).

Pour cette pièce test, notre choix sera guidé par la recherche du compromis suivant : couvrir le plus grand nombre de configurations d'usinage (afin de ne pas omettre un cas discriminant), sans toutefois trop augmenter la complexité de la pièce (afin de pouvoir clairement identifier à quoi

sont dues des variations, en évitant que plusieurs phénomènes interagissent, ainsi que de permettre à d'autres laboratoires de reproduire cette expérimentation). On peut trouver différents benchmarks dans la littérature [Duc98], [Dug02], [Ter05] (inspiré de la pièce test ISO 10791-7). Mais ces pièces ont pour but d'identifier si les défauts de qualité des pièces sont dus à la FAO (génération de trajectoires) ou au comportement de la machine-outil (suivi de trajectoire et ralentissements de la machine au passage des discontinuités de trajectoires par exemple). Or, notre objectif est différent, il s'agit de pouvoir surveiller l'usinage d'une pièce quelconque.

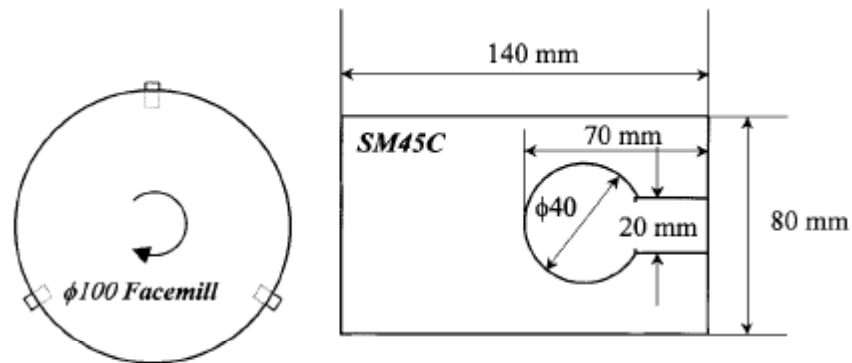


Figure 33. Pièce test de Kim et Chu [Kim01].

Kim et Chu [Kim01] proposent de réaliser une passe rectiligne, pour laquelle l'engagement radial varie mais pas l'avance de l'outil, cette pièce n'est donc pas satisfaisante pour notre étude (Figure 33). Nous allons donc concevoir une nouvelle pièce test où et l'avance et l'engagement radial varieront. Voyons maintenant quelles stratégies d'usinage sont généralement utilisées lors d'opérations d'ébauche.

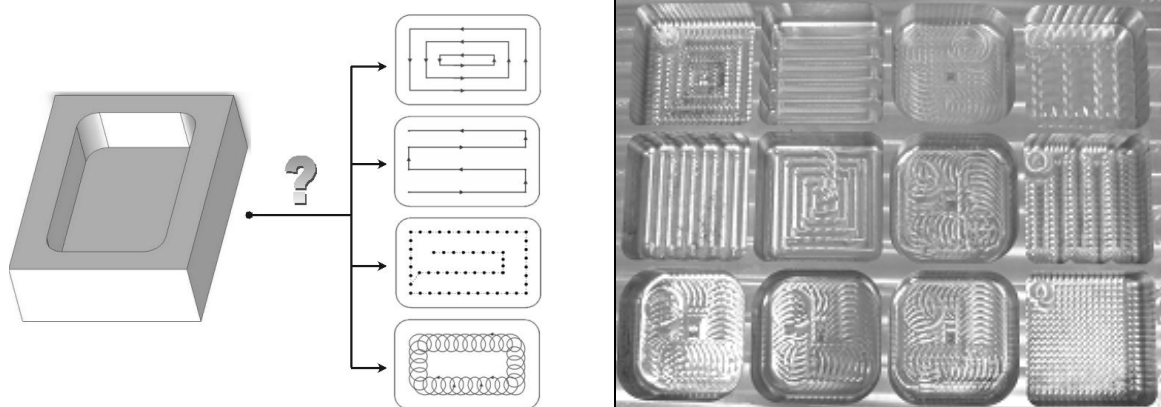


Figure 34. Stratégies d'usinage pour l'évidement de poches [Has06].

Les stratégies d'usinage les plus communes pour l'enlèvement de matière en ébauche sont des parcours par balayage (de l'extérieur vers l'intérieur) pour les poches ouvertes et en colimaçon (de l'intérieur vers l'extérieur) pour les poches fermées. De nouvelles stratégies sont également proposées, comme les trajectoires trochoïdales et le tréflage. Notons que cette dernière est

particulièrement adaptée pour l'usinage de poches profondes [Has06]. Dans l'ensemble, les trajectoires d'usinage générées peuvent se décomposer comme suit :

- des trajets rectilignes (circulaires ou de géométrie plus complexe encore), où avance et engagement de l'outil sont constants,
- des entrées matières, où l'engagement de l'outil augmente progressivement,
- des sorties matières, où l'engagement de l'outil diminue progressivement,
- des transitions, où l'engagement varie : l'outil pénètre ou sort partiellement de la matière
- des virages (plus ou moins brusques), où l'avance chute et l'engagement de l'outil évolue (Figure 35).

Ces éléments de trajectoire peuvent être réalisés en avalant, en opposition ou en rainurage. Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive et pourrait être affinée. Néanmoins, si l'on se limite à des usinages de type 2 axes $\frac{1}{2}$, ces quelques éléments de trajectoires permettent de décrire la majeure partie des configurations d'engagement de l'outil dans la matière pouvant être rencontrées, même pour une stratégie en trochoïde par exemple.

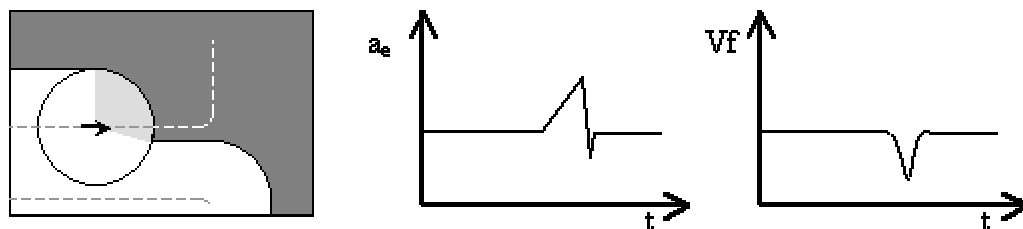


Figure 35. Variations présumées de l'engagement radial et de l'avance, lors d'un changement de direction de 90° .

Afin de retrouver ces divers éléments, nous avons choisi la poche représentée Figure 36. En effet, on retrouve bien une entrée matière, des passes rectilignes et circulaires, des transitions (avant chaque virage) et des virages plus ou moins brusques. Au passage de ces derniers, on peut donc s'attendre à ce que la machine ralentisse différemment, entre la zone 1 et la zone 2. De plus, la stratégie par balayage permet une alternance entre les passes en avalant et en opposition. Enfin, une passe de finition sur les flancs de la poche termine l'usinage de chaque niveau en enlevant la surépaisseur de 0,5 mm ainsi que les crêtes laissées entre les passes.

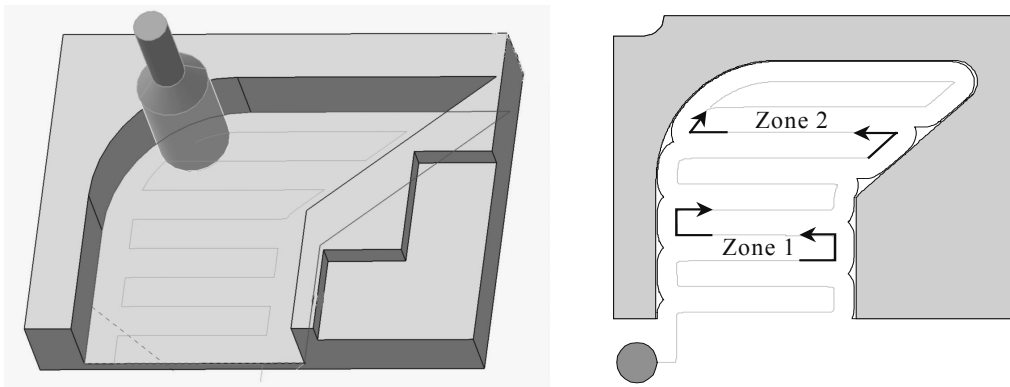


Figure 36. Pièce test et trajectoires.

Les configurations d'usinage contenues dans la pièce test (en terme d'avance et d'engagement radial) devraient être discriminantes pour juger de la pertinence des critères retenus.

1.4. Expérimentations

1.4.1. Protocole

La pièce définie précédemment a été réalisée avec 2 outils différents et pour plusieurs avances et engagements radiaux nominaux. Comme la vitesse de coupe est de 650 m/min, des vitesses de broches de $N = 6\,500$ et $10\,000$ tr/min ont été programmées, ainsi que des avances de 1 à 6 m/min. Ainsi les expérimentations ont été réalisées dans des conditions de coupe industrielles, contrairement à bon nombre de publications.

Les essais ont été réalisés sur un Centre d'Usinage Sabre de Cincinnati équipé d'une commande numérique Num 760. Les efforts ont été mesurés par une table dynamométrique 3 composantes Kistler 9257A, à la fréquence d'échantillonnage de 64 kHz. Les codeurs des X et Y de la machine étaient également mesurés [Dug02], à la fréquence de 500 Hz.

Paramètre	Valeur
Avance à la dent	0,08 0,12 0,16 0,2 mm/dent
Engagement radial	15, 40, 65, 90 % diamètre outil
Outil 1	Fraise de diamètre 32 mm avec 2 plaquettes
Outil 2	Fraise carbure de diamètre 20 mm avec 3 dents
Engagement axial	2,5 mm
Matière	Alliage d'aluminium 7075
Vitesse de coupe	650 m/min

Tableau 2. Paramètres opératoires des expérimentations.

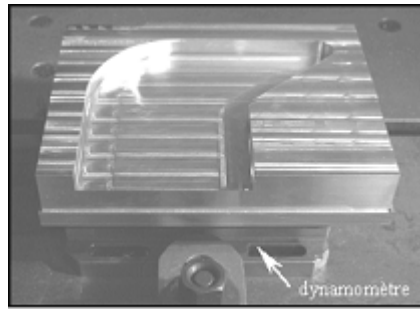


Figure 37. Table dynamométrique, montée entre la pièce et la table de la fraiseuse.

1.4.2. Traitement des mesures d'effort

Les efforts mesurés en X et en Y sont filtrés à deux fois la fréquence de passage des dents avant de calculer la résultante des efforts de coupe. En effet, la table dynamométrique est sollicitée par des fréquences de passage de dent élevées qui la font vibrer. Il est donc nécessaire de filtrer ces données en amont.

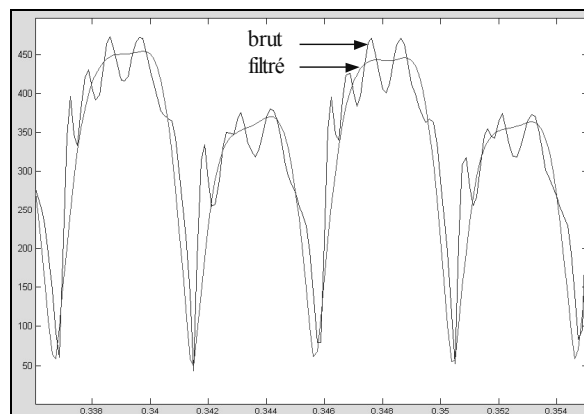


Figure 38. Résultante des efforts de coupe, calculée à partir d'efforts filtrés ou non.

Afin de calculer les critères de surveillance d'usinage retenus, la valeur d'effort maximale et minimale correspondant à chaque passage de dent est nécessaire. [Dey95] proposent une méthode de recherche de proche en proche, que nous avons mise en œuvre puis améliorée ici. En effet, [Kim01] ne précisent pas comment ils obtiennent les valeurs de crêtes-à-creux. Pourtant, la rainure réalisée auparavant dans leur pièce test (Figure 33) complique la tâche car chaque dent entre et sort de la matière 2 fois par tour de broche. Or, une seule valeur PV_j est calculée par dent et par tour de broche... La solution proposée par Altintas est plus robuste : il synchronise l'acquisition des mesures d'effort grâce au codeur de broche [Alt89]. Ainsi, tant que l'outil ne change pas de direction, on sait précisément quelle dent est en train d'usiner. Néanmoins, nous ne disposons pas actuellement de cette information codeur, au niveau expérimental. C'est pourquoi nous avons retenu la méthode de post-traitement de [Dey95]. En voici le principe :

Tout d'abord, la fréquence réelle de rotation de la broche est obtenue par une analyse fréquentielle (Transformée de Fourier Directe, *FFT*) des efforts de coupe, sur une zone de coupe stable.

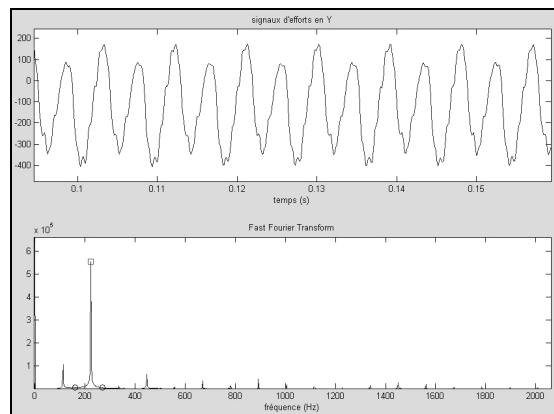


Figure 39. Recherche de la vitesse de broche réelle à partir d'une FFT.

La dent qui génère les efforts les plus importants est désignée dent N°1. A partir, d'un premier pic d'effort de cette dent N°1, le maximum et le minimum de la résultante des efforts de coupe sont recherchés de proche en proche, à chaque passage de dent qui suit : le maximum correspondant à la dent suivante est recherché sur un intervalle (entre deux triangles sur la partie agrandie de la Figure 40, le carré symbolisant le maximum qui a été trouvé), centré exactement une période de passage de dent T_c après le maximum de la dent précédente.

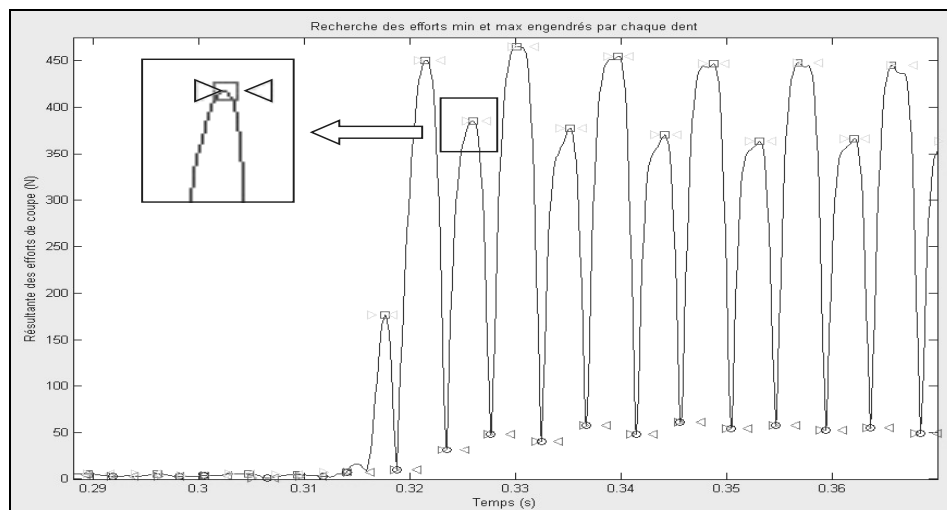


Figure 40. Recherche de proche en proche des extremums des efforts pour chaque passage de dent.

La largeur de cet intervalle de recherche est un paramètre sensible. En effet, un intervalle trop petit peut ne pas contenir le maximum si le précédent était excentré à cause de résidus de vibrations. A l'inverse, si celui-ci est trop large, le maximum alors extrait peut correspondre au

travail réalisé par une autre dent, comme sur la Figure 41. Cette méthode s'inspire de Deyuan et al., qui recherchent les pics d'efforts sur un intervalle de 100% de T_c [Dey95]. Nos expérimentations ont montré que cela n'était pas robuste. Par contre, la valeur de 55% de la période de passage des dents (déterminée empiriquement) s'est avérée un bon compromis.

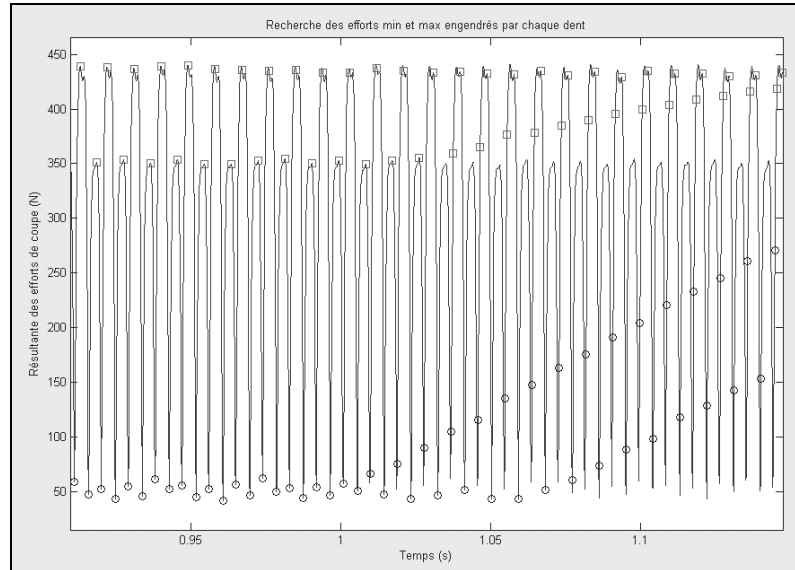


Figure 41. Divergence de l'algorithme de recherche de proche en proche [Dey95].

Une fois les crêtes et creux extraits des efforts de coupe générés à chaque passage de dent, les critères peuvent être calculés à l'aide des équations 11, 12 et 13.

1.4.3. Traitement des mesures de codeurs d'axes

Si les mesures d'efforts nous permettent de calculer les valeurs des critères au cours de l'usinage, les mesures de codeur d'axe vont nous permettre de connaître les conditions de coupe réelles (avance et engagement radial) à chaque instant et ainsi mieux comprendre et analyser les variations des critères.

Les codeurs donnent les positions des axes X et Y de la machine à chaque instant. Il est alors possible de comparer la trajectoire réelle avec le modèle FAO et d'observer les erreurs de suivi de trajectoire, Figure 42. Elles sont dues aux limites de l'asservissement des axes de la machine, notamment en terme d'accélération [Dug02].

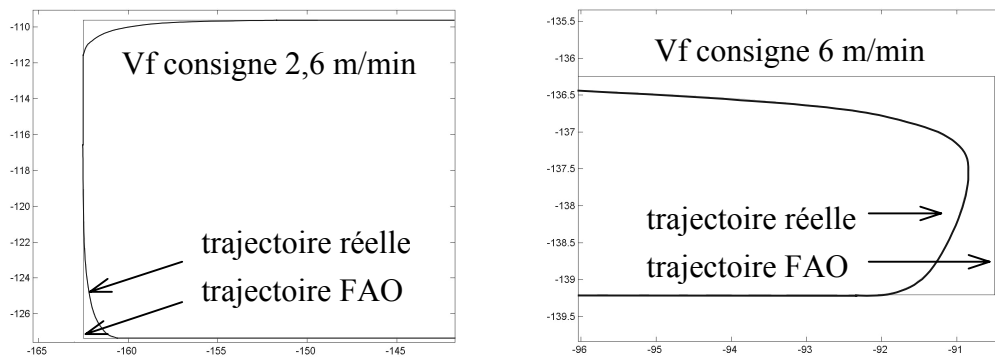


Figure 42. Erreur de suivi de trajectoire (les valeurs sont en millimètres).

La vitesse des axes de la machine est obtenue en dérivant les positions (Te_{codeur} est la période d'échantillonnage). La dérivée symétrique doit toujours être utilisée car l'erreur n'est alors que du 2nd ordre [Dae05].

$$V_x(t) = \frac{X(t + Te_{codeur}) - X(t - Te_{codeur})}{2 \cdot Te_{codeur}} \quad 22$$

La vitesse d'avance instantanée de l'outil Vf est alors la résultante des vitesses des axes X et Y. De même, en dérivant la vitesse des axes, on obtient l'accélération de ces derniers Γ_x et Γ_y . On peut ainsi identifier, sur les trajets en avance rapide, que l'accélération des axes de la machine-outil utilisée est limitée à 1 m/s², soit environ 0,1 g.

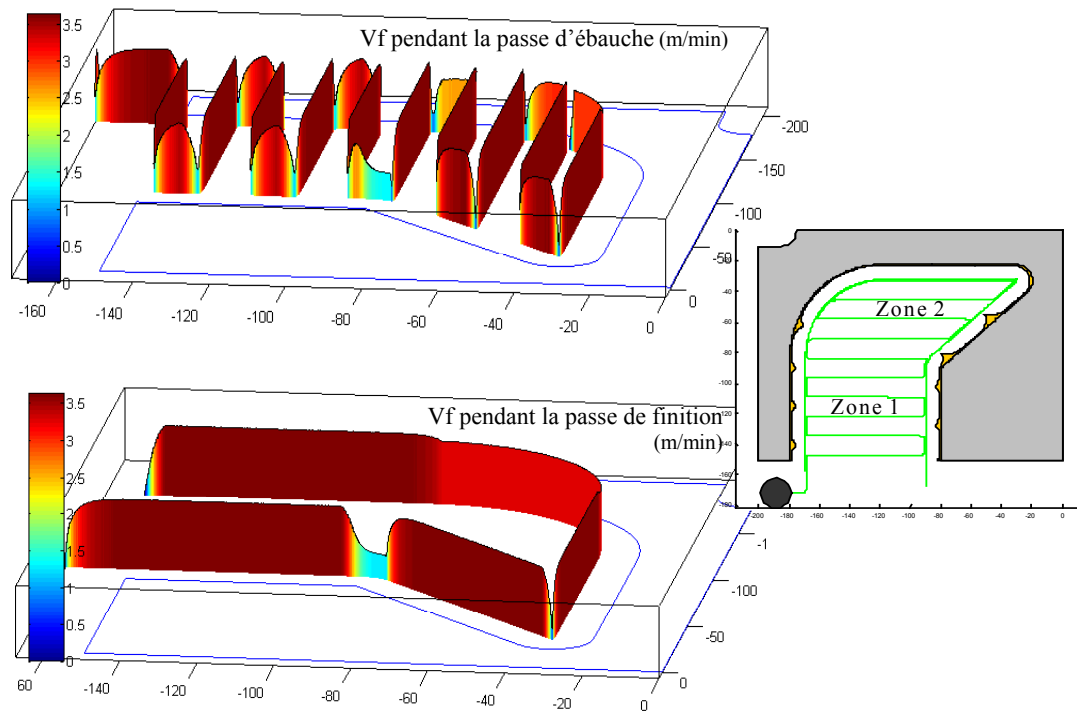


Figure 43. Vitesse d'avance instantanée lors de l'usinage de la pièce.

(outil $\varnothing 20$ à 3 dents, consignes FAO : $Vf = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$)

Sur la Figure 43, la vitesse d'avance instantanée est représentée sur l'axe Z, en fonction de la position réelle de l'outil lors de l'usinage de la pièce. A droite, la pièce en gris représente la pièce finie (reconstruite à partir des positions réelles de l'outil) et le contour jaune représente la pièce semi-finie. Comme l'accélération des axes de la machine est limitée, des ralentissements sont observés lors des changements de direction. La consigne de vitesse était de 3,6 m/min. Cette vitesse est atteinte sur les passes rectilignes mais chute à 1,15 m/min pour franchir les virages à 90° (zone 1) et à 0,55 m/min pour les virages avec rebroussement (zone 2). On peut également remarquer que, sur la partie en arc de cercle de la passe de finition, l'avance n'excède pas 3,34 m/min. Pourtant l'accélération de la machine devrait permettre d'atteindre la consigne de vitesse pour un rayon de courbure de 50 mm. Cela est dû au format de description de la trajectoire : elle est décrite par interpolation linéaire, ce qui nuit au traitement qu'en fait la CN [Dug02] [Lar04].

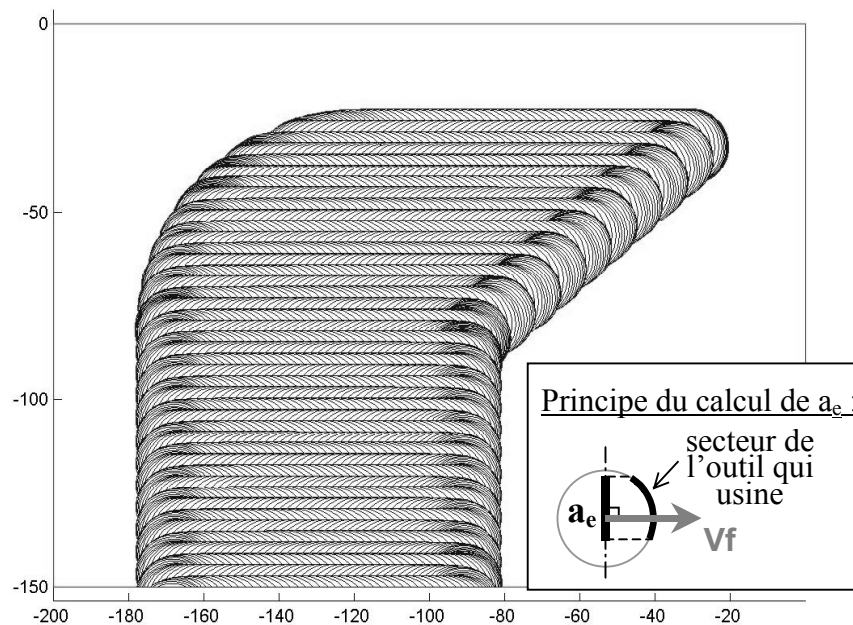


Figure 44. Calcul itératif de l'engagement radial instantané.

Connaissant la position de l'outil à chaque instant, il est également possible de déterminer quel volume de matière est enlevé ainsi que la zone de contact entre l'outil et la pièce, et en déduire l'engagement radial à chaque instant. L'engagement radial est défini comme étant la longueur de la partie projetée (sur le diamètre perpendiculaire à la direction d'avance) du secteur de l'outil en contact avec la matière (schémas en bas à droite de la Figure 44). Il est ensuite exprimé en pourcentage du diamètre de l'outil. Pour cela, une méthode itérative basée sur des éléments finis est utilisée. Le contour de la pièce et l'enveloppe du mouvement de l'outil entre 2 positions (oblongue) sont discrétisés en segments. Pour chaque nouvelle position de l'outil, l'intersection entre le contour de la pièce et l'enveloppe est recherchée. Les intersections entre segments sont obtenues par méthode analytique. Le nouveau contour de la pièce est alors obtenu. Quant à

l'outil, les positions angulaires auxquelles les dents entrent et sortent de la matière sont également extraites. L'engagement radial instantané de l'outil a_e est alors connu. Le contour de la pièce et a_e sont ainsi calculés chaque fois que l'outil avance de 0,05 mm.

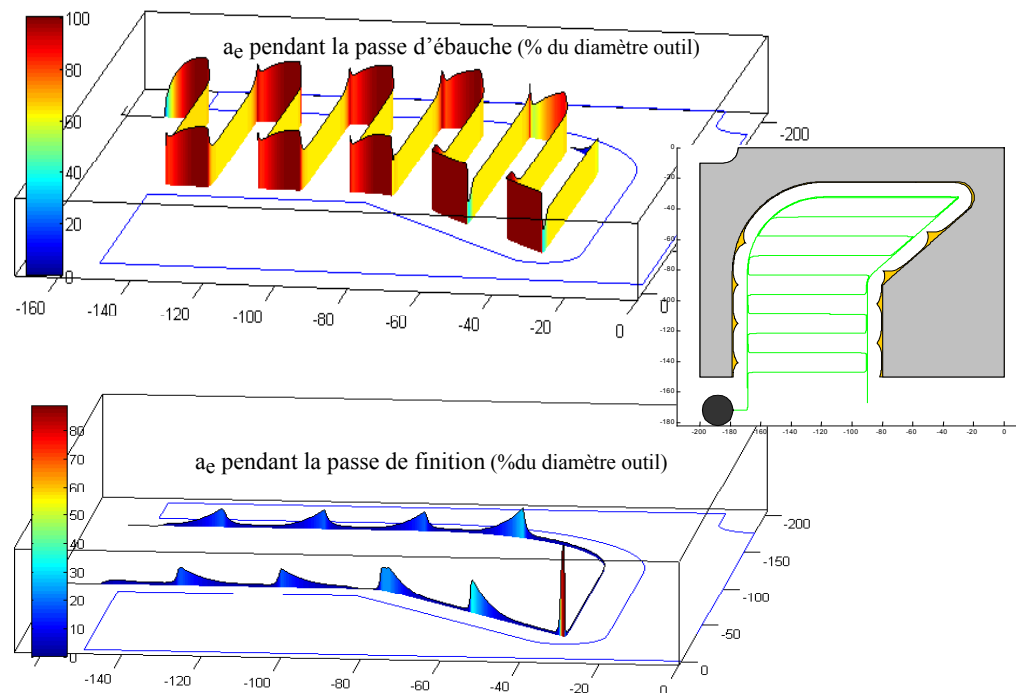


Figure 45. Engagement radial instantané lors de l'usinage de la pièce.
(outil $\varnothing 20$ à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$)

Sur la Figure 45, l'engagement radial instantané est représenté sur l'axe Z, correspondant à chaque position (X,Y) de l'outil lors de l'usinage. En ébauche, l'engagement radial augmente sur les passes de liaisons et peut atteindre une immersion totale, dépassant alors la consigne FAO programmée. En effet, l'outil est alors en train de pénétrer dans la matière, afin de se positionner pour réaliser la passe suivante avec l'engagement souhaité. En finition, la charge augmente brusquement lorsque l'outil rencontre une crête (laissée entre 2 passes d'ébauche), de même que lorsqu'il usine le coin au fond de la poche. On aura alors de brusques variations des efforts.

Le traitement des mesures de codeurs d'axe nous permettent ainsi de connaître, à chaque instant de l'usinage de la pièce test, les conditions de coupe réelles. Cela va nous permettre de comprendre l'évolution des efforts de coupe.

1.5. Implémentation des critères

Nous avons vu au paragraphe 1.4.2 comment les pics et creux sont extraits des efforts mesurés lors de l'usinage de la pièce test. Ils permettent le calcul des critères retenus, à l'aide des équations 11, 12 et 13. Nous allons maintenant analyser leurs comportements au cours de l'usinage, suivant le type de configurations rencontrées, en terme d'évolution de l'avance et de

l'engagement radial. Nous allons tout d'abord étudier le cas d'une zone de coupe où les conditions de coupe restent identiques. Nous nous consacrerons ensuite aux virages ordinaires (la zone 1 de notre pièce test) et ceux à rebroussement (zone 2). Enfin, nous traiterons des passes de finitions et nous évoquerons quelques événements bénins survenus lors de nos essais.

1.5.1. Zone de coupe stable

Lorsque la coupe est stable, les conditions de coupe ne varient pas et les efforts de coupe varient très peu. C'est le cas sur la Figure 46 avant 9,33s et après 9,9s. Les 2 premiers graphes nous montrent l'avance et l'engagement radial instantanés calculés à partir des mesures de codeurs. Le graphe suivant nous présente la résultante des efforts de coupe, en bleu à l'arrière plan, ainsi que les valeurs de crête-à-creux $PV_j(n)$ qui en sont extraites pour chaque dent et pour chaque tour de broche n . Les PV_j diffèrent selon les dents, principalement à cause du battement radial des dents et de la géométrie des arêtes qui impriment sur les signaux d'efforts la signature particulière de l'outil. Le rapport de crêtes-à-creux des efforts entre dents adjacentes (présent au numérateur du TFI) est très peu différent de sa moyenne sur les 10 derniers tours de broche. Comme souhaité par son concepteur, le TFI s'affranchit ainsi de la signature de l'outil et vaut alors environ 1.

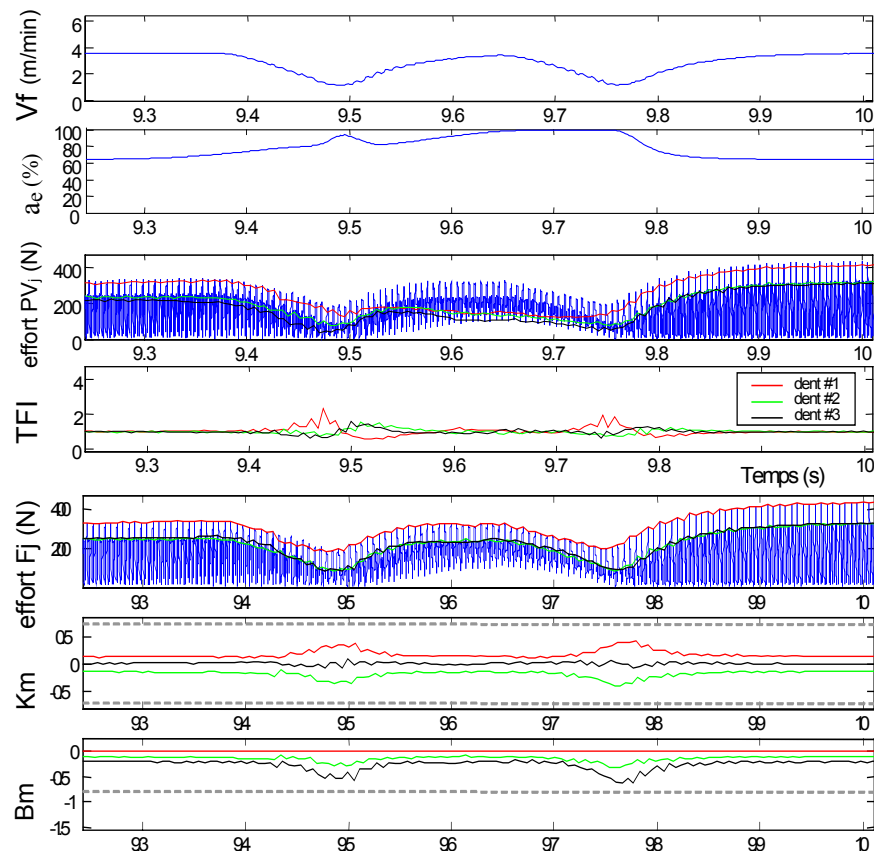


Figure 46. Comportement des critères lors de virages ordinaires.
(outil $\varnothing 20$ à 3 dents, consignes FAO : $Vf = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$)

Le 5^e graphe (en partant du haut, Figure 46) présente cette fois-ci les pics, extraits de la résultante des efforts de coupe pour chaque dent. Bm et Km prennent un jeu de valeurs pour chaque dent, caractéristique de la signature de l'outil sur les efforts de coupe, comme observé sur les 2 derniers graphes. Nous proposons ici de représenter les valeurs des critères par autant de courbes que de dents (qui varient ensuite en fonction des tours de broche). Cela permet de mieux apprécier la contribution de chaque dent et surtout cela permet d'interpréter plus facilement ces graphes. Cette représentation évite d'avoir des courbes en dents de scie alors que tout est stable (Figure 47). En effet, traditionnellement, les auteurs représentent l'évolution de leurs critères en fonction du temps uniquement et donc du $t^{\text{ième}}$ passage d'une dent quelconque alors que, le fraisage, c'est avant tout plusieurs dents. Les critères de surveillance d'usinage permettent d'élaborer une image de l'état de chaque dent, à partir des efforts de coupe. Ainsi, chaque dent doit être suivie individuellement.

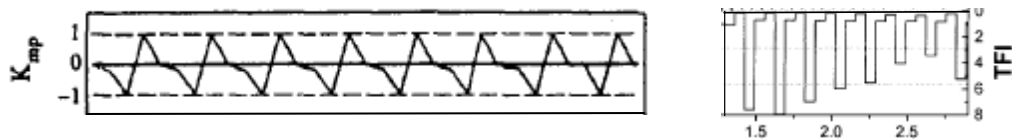


Figure 47. Courbes en dents de scie dues à une représentation en fonction du temps uniquement, et non dent par dent [Dey95] [Kim01].

Lorsque la coupe est stable, la Figure 46 montre que les critères TFI , Bm et Km varient très peu et sont loin des seuils de détection de bris. Par conséquent, ils devraient permettre d'identifier correctement tout endommagement de l'outil.

1.5.2. Virage ordinaire

L'analyse de Figure 46 nous permet d'expliquer le cas de changement de direction à 90°. Ces virages sont très fréquents lors de l'usinage d'une pièce par balayage, nous parlerons donc de virage « ordinaire ». Tout d'abord, les axes de la machine ralentissent au passage des virages car leur accélération est limitée. Ainsi l'avance passe de 3,6 m/min (la consigne) à 0,78 m/min. A la date de 9,5 s, le premier virage est franchi et la passe de lien débute. L'outil pénètre alors dans la matière et l'engagement radial atteint 100% du diamètre. Après le second virage, l'engagement radial diminue et revient à la consigne programmée en FAO (de 65% du diamètre).

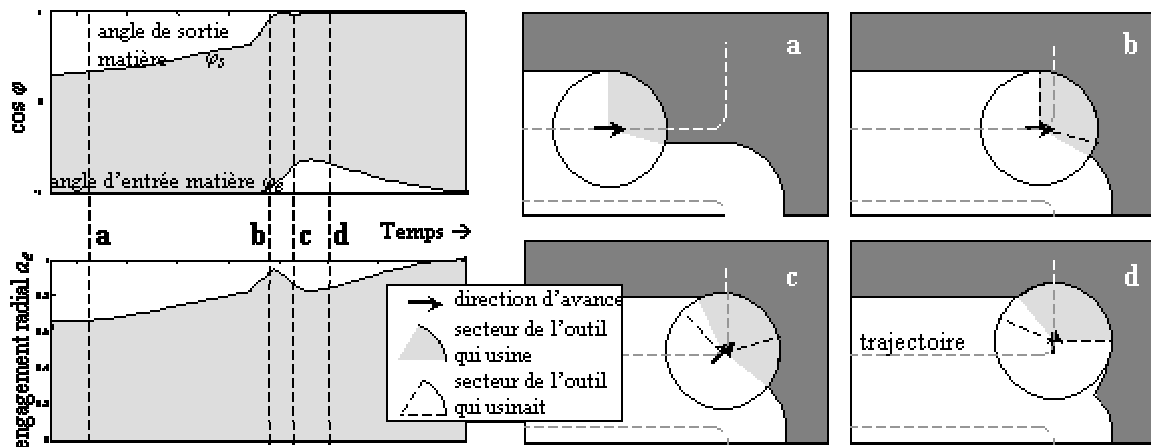


Figure 48. Variations de l'engagement radial lors du franchissement d'un virage ordinaire (établies à partir des mesures de codeurs d'axe).

Au passage du premier virage, on peut observer l'engagement radial varie également [Rit06a]. Etudions plus précisément cet évènement, grâce à la figure ci-dessus. Tout d'abord, vers la fin de la passe rectiligne précédant le virage, l'engagement radial augmente progressivement à cause de la matière laissée lors de la passe précédente (entre les positions *a* et *b* de l'outil). Le virage débute à la position *b*. Comme l'accélération des axes des machines-outils est limitée, l'avance chute et le directeur de commande numérique insère une portion de cercle à l'endroit du changement de direction, pour permettre le franchissement du virage avec un ralentissement acceptable de l'outil. C'est un compromis entre le respect de la vitesse d'avance programmée et celui de la qualité de la trajectoire programmée [Dug02]. Revenons à l'engagement radial et considérons le mouvement du centre de l'outil. Entre les positions *b* et *c*, le centre instantané de rotation se situe à la gauche de l'outil. Son flanc droit pénètre dans la matière, ainsi les dents sortent de plus en plus tard de la matière. L'angle de sorti des dents φ_s augmente, jusqu'à ce que l'outil se retrouve à usiner en avalant. Sur le flanc gauche de l'outil, la matière a déjà été partiellement retirée et, sur chaque tour de broche, les dents pénètrent de plus en plus tard dans la matière. Ainsi l'angle d'entrée des dents dans la matière φ_e augmente progressivement entre les positions *b* et *d*. L'engagement radial atteint un pic à la position *c* car φ_s y a atteint son maximum et que, sur la 2^e partie du virage ensuite, φ_e continue d'augmenter, diminuant ainsi le secteur engagé de l'outil (entre les positions *c* et *d*). Après la position *d*, la passe de liaison débute et l'outil pénètre droit dans la matière. Ceci a pour effet de diminuer φ_e et ainsi d'augmenter le secteur de l'outil engagé dans la matière, jusqu'à ce que ce dernier le soit entièrement. Le changement de direction est ici de 90°. Si le virage est plus brusque, davantage de matière a été

enlevée sur la 1^{ère} partie du virage, ainsi sur la 2^{nde} la chute de l'engagement radial est d'autant plus importante.

Sur la Figure 46, l'engagement radial ainsi calculé est toujours supérieur à 50% du diamètre de l'outil. L'épaisseur nominale de copeau est définie par $h_c(\varphi) = f_z \cdot \sin \varphi$ [Mar41]. Son maximum est donc $h_c = f_z \cdot \max\{\sin \varphi\}$. Or ici, $\max\{\sin \varphi\}$ est toujours égal à un. Par conséquent, l'épaisseur de copeau maxi et donc les pics d'efforts sont uniquement dus à l'avance f_z . Ceci explique pourquoi l'évolution des maximums des efforts de coupe est similaire à celle de la vitesse d'avance, indépendamment de l'engagement radial. Par contre, un a_e important va faire que plusieurs dents peuvent être engagées dans la matière simultanément ; d'où des efforts minimaux pas nécessairement nuls. Les valeurs de crête-à-creux PV_j sont alors affectées. Par conséquent, les courbes de pics d'efforts F_j (servant au calcul de Bm et Km) sont uniquement affectées par l'avance et celle des PV_j (servant au calcul du TFI) par l'avance et l'engagement radial. On observe que les variations des critères ainsi calculés sont faibles. Aucune détection abusive de bris n'aurait été déclenchée : les valeurs restent en deçà des seuils proposés (en pointillés). Ainsi, pour les variations de conditions de coupe modérées qui sont rencontrées lors de l'usinage de ces virages ordinaires, les critères sont fiables.

1.5.3. Virage avec rebroussement

La Figure 49 permet d'étudier le comportement des critères lors de l'usinage de la 2^e partie de la poche. Sur la fin de la passe rectiligne, l'outil pénètre dans la matière et l'engagement radial atteint 100% du diamètre de l'outil. Le premier virage est plus favorable en terme d'avance. Par contre, les changements de conditions de coupe sont importants au passage du second virage. En effet, il y a rebroussement et l'avance chute à 0,52 m/min, avec un rayon de courbure de 0,15 mm au passage de la discontinuité. Sur la 2^e partie de ce virage (après la position c de la Figure 48), une part importante de la matière située à gauche de l'outil a déjà été enlevée et les dents n'entrent que tardivement dans la matière, d'où un φ_e élevé et une chute de l'engagement radial jusqu'à 35% du diamètre. Un a_e de 35% correspond à un angle φ de 75° d'où $\max\{\sin \varphi\} = 0,95$ (au lieu de 1 précédemment). Donc cette chute de l'engagement radial ne fait diminuer l'épaisseur de copeau que de 5% et ce sur la 2^{nde} partie du virage, où l'avance augmente à nouveau. Par conséquent, l'influence de l'engagement radial est ici négligeable.

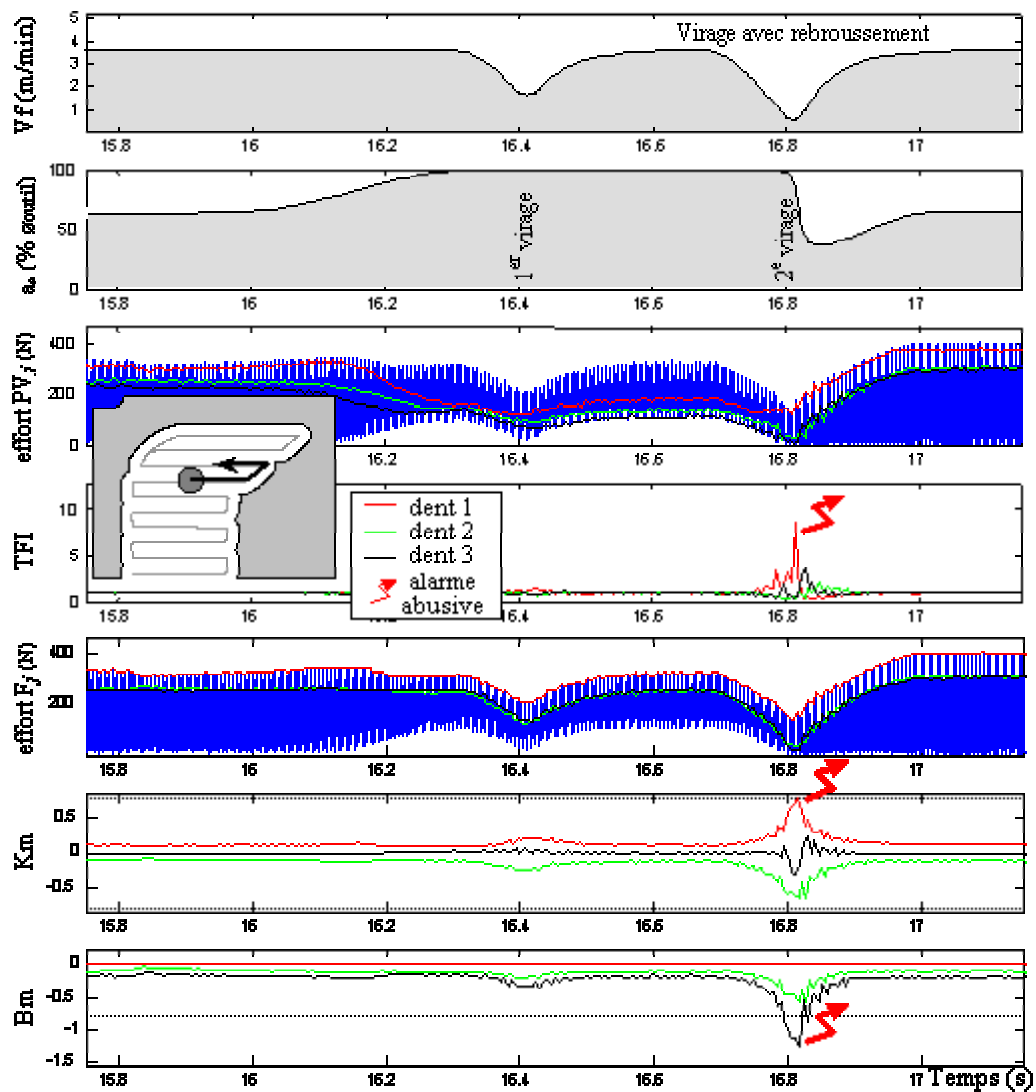


Figure 49. Comportement des critères lors de changements de direction avec rebroussement.
(outil $\varnothing 20$ à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 65\%$)

Par contre, la chute de l'avance fait diminuer l'épaisseur de copeau nominale de 85%. Ainsi, du fait du battement radial, certaines dents vont à peine usiner. Il en résulte des pics d'efforts très faibles, comme on peut le voir pour les dents N° 2 et 3 ; et des détections abusives auraient été déclenchées par les critères (alors qu'aucun incident n'a eu lieu lors de nos expérimentations). Ces détections abusives s'expliquent en considérant les formulations équivalentes des critères (équations 19 à 21, [Gar05]). Cela est dû à une épaisseur de copeau trop faible, dont la cause est ici la chute de l'avance ; mais ce cas de figure se rencontre également lors des phases d'entrée et de sortie matière ainsi qu'en finition (selon les conditions de coupe programmées) et la cause est alors un engagement radial trop faible (comme nous le verrons dans le paragraphes suivant). Ainsi les critères retenus ne sont pas fiables lors de changements importants des conditions de

coupe [Rit06a]. Ceci va à l'encontre de ce que suggéraient les concepteurs de ces critères [Dey95] [Kim01].

1.5.4. Passe de finition

La passe de finition enlève les 0,5 mm ainsi les crêtes laissés sur les flancs de la poche lors de l'ébauche. La Figure 50 présente la finition du coin situé au fond à droite de la poche. L'engagement radial y augmente brusquement. Cela est normal au vu de la géométrie des trajectoires FAO d'ébauche et de finition dans cette zone. L'avance chute également de manière importante car le virage présente un point de rebroussement. On peut noter que, juste après le passage du virage (lorsque la vitesse d'avance augmente à nouveau), les 3 critères auraient déclenché des alarmes intempestives, à cause de la chute de a_e [Gar05]. On peut également noter que, lorsque la coupe est stable et que l'outil enlève les 0,5 mm laissés sur les flancs de la poche (avant et après le virage), Bm est systématiquement en dehors des seuils et Km en est très proche. Il en résulterait donc une alarme permanente en finition.

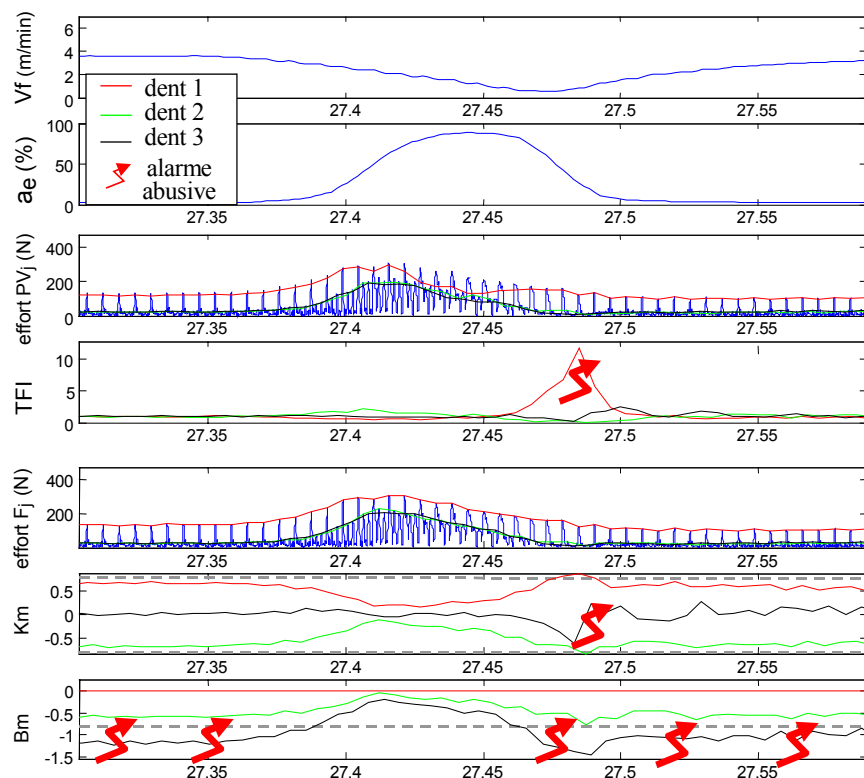


Figure 50. Comportement des critères lors de finition du coin situé au fond à droite de la poche.

(outil $\varnothing 20$ à 3 dents, consignes FAO : $V_f = 3,6$ m/min, $a_e = 0,5$ mm)

1.5.5. Incidents bénins

Les principales causes du manque de fiabilité des systèmes de Surveillance d'Usinage traitées dans la littérature sont le battement radial des dents et les changements de conditions de coupe. Les critères retenus [Dey95] [Kim01] s'affranchissent du battement radial des dents. Néanmoins, nous avons vu précédemment que certaines configurations d'usinage, en terme d'avance et d'engagement radial, montrent que les critères étudiés ne sont pas fiables. Leur principe consiste à détecter l'instant où un incident particulier survient et à déclencher une alarme aussitôt. Or, il existe des cas où les efforts de coupe varient brusquement, sans pour autant qu'un incident nécessitant l'arrêt de la production ne soit arrivé (ni que les conditions de coupe aient changé). Lors des essais que nous avons menés, nous avons rencontré de tels phénomènes. C'est par exemple le cas lorsqu'un recyclage de copeau survient : le système de Surveillance d'Usinage doit passer outre et l'usinage doit continuer.

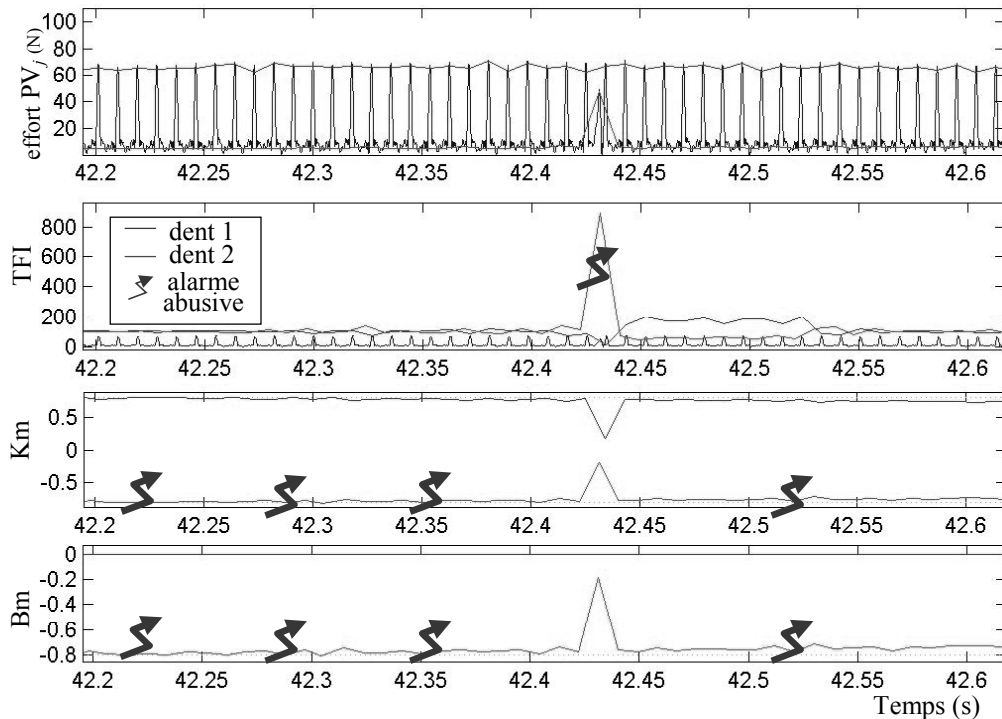


Figure 51. Recyclage de copeau lors d'une passe de finition rectiligne.

(outil à 2 plaquettes, $f_z=0,08$ mm/dent, $a_e=0,5$ mm)

La Figure 51 présente l'usinage d'une passe de finition rectiligne, qui enlève les 0,5 mm laissés sur le flanc de la poche. On peut remarquer que, lorsque la coupe est stable, une seule dent participe à la coupe. En effet, le battement radial de l'autre dent est trop faible (devant l'épaisseur de copeau qui est ici de 0,02 mm). Néanmoins, au tour de broche correspondant à la date 42,43 secondes, la 2nde dent participe soudainement à la coupe. Ceci est très probablement dû au recyclage d'un copeau. A la suite de cet incident bénin, la coupe redevient stable. Seule la

dent 1 usine, avec les mêmes niveaux d'efforts qu'auparavant. L'outil n'a donc pas été endommagé. Pourtant, le *TFI* aurait déclenché une alarme intempestive.

Le comportement des critères de [Dey95] est ici insatisfaisant. En effet, lorsque la coupe est stable, les niveaux des critères sont très proches des seuils de détection de bris. Ces seuils sont régulièrement franchis du fait de la variabilité du process. Par contre, lorsqu'un événement anormal survient, ils s'en éloignent. Pourtant, le but de ces critères est justement de détecter l'instant où un événement anormal survient. Cet objectif (qui n'est pas nécessairement le meilleur) est donc loin d'être atteint pour *Bm* et *Km*, ici en finition.

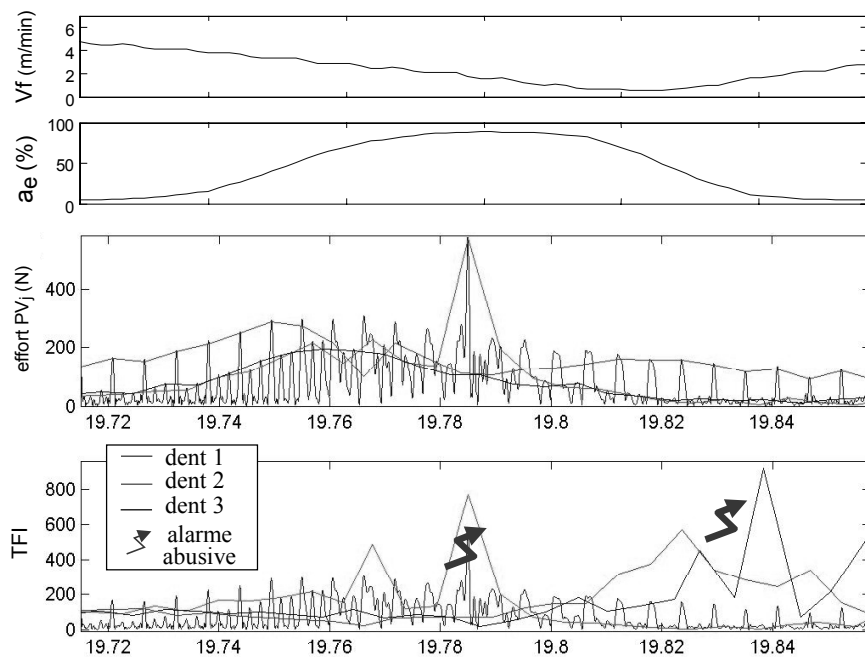


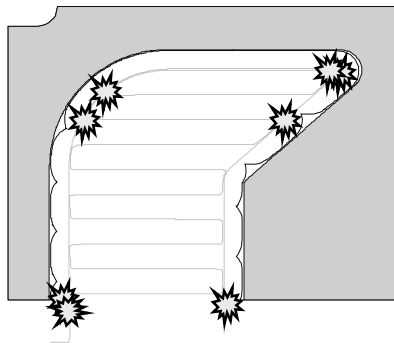
Figure 52. Comportement du critère *TFI* en cas d'incidents bénins tel qu'un recyclage de copeau, survenant lors de changements de conditions de coupe.
(outil à 3 dents, consignes FAO : $V_f=4,8$ m/min, $a_e=0,5$ mm)

La Figure 52 présente également un cas de recyclage de copeau. Ce dernier est survenu lors de la finition du coin au fond à droite de la poche (déjà présenté au paragraphe 1.5.4 et Figure 50, mais pour une avance plus faible). Nous avons vu que l'engagement radial y augmente fortement. En outre, l'outil possède 3 dents. L'évacuation des copeaux se fait moins bien. Un recyclage de copeau n'est donc pas surprenant à cet endroit là. Le *TFI* aurait déclenché une alarme à tort et l'usinage aurait été stoppé abusivement (la 2nde alarme est due à la chute de l'avance, Figure 49 et Figure 50). Néanmoins, nous pouvons noter que ce critère a réussi à détecter qu'un incident bref (pouvant ressembler à un bris) est survenu, ce que les critères de [Dey95] n'ont pas vu. En effet, leur comportement est ici le même que sur la Figure 50.

Le recyclage de copeau fait partie d'un type d'incident qui est totalement bénin et qui ne nécessite, en aucun cas, l'arrêt de la production. Néanmoins, il peut être source d'un nombre important de détection abusive et nuire à la fiabilité des systèmes de Surveillance d'Usinage. Pourtant, ces incidents bénins ne sont que trop rarement évoqués dans la littérature.

1.5.6. Conclusions préliminaires

Les 3 critères de surveillance d'usinage retenus pour être expérimentés, se sont avérés ne pas être fiables. Même si, lorsque les conditions de coupe sont stables ou que les variations sont modérées, les critères permettent des détections de bris fiables (d'après [Kim01] et [Dey95]), des détections abusives seraient déclenchées dans le cas où certaines des dents ne participeraient pas à la coupe : lors des phases d'entrée et de sortie matière, de virages avec rebroussement ou de passes de finition (selon les conditions de coupe programmées) ; ou bien encore si des incidents brusques mais bénins perturbent les signaux d'efforts pendant quelques tours de broche. Le principal problème des critères de surveillance d'usinage de ce type est de distinguer correctement zone de coupe transitoire et incident réel, en cas de variations des efforts de coupe.



*Figure 53. Détections abusives des critères [Dey95][Kim01]
lors de l'usinage d'un niveau de la poche.*

Dans l'exemple d'usinage de poche que nous avons traité, aucun n'incident n'est survenu lors des expérimentations. Pourtant, environs 6 détections abusives ont été déclenchées par niveau de la poche, en appliquant les critères retenus aux signaux d'efforts mesurés. La poche comportant 10 niveaux, il en résulterait pas moins de 60 arrêts intempestifs de l'usinage. Notre pièce test est pourtant relativement simple, qu'en serait-il pour l'usinage d'un moule ou d'une pièce aéronautique ? Ce grand nombre de détections abusives fait qu'un tel système de surveillance d'usinage serait rapidement débranché par l'utilisateur [Jem99]. En l'état, ces critères ne sont donc pas suffisamment fiables. Nous nous proposons donc de concevoir une nouvelle méthode de surveillance d'usinage permettant de palier ce problème de fiabilité.

2. Besoins en Surveillance d'Usinage

2.1. Attentes industrielles

Avec le passage à l'Usinage Grande Vitesse, les avances ont considérablement augmenté, notamment pour l'usinage d'alliages légers comme ceux à base d'aluminium. Dans ces conditions, le temps de réaction de l'opérateur est trop important en cas d'incident et l'énergie cinétique mise en jeu peut non seulement endommager la pièce mais aussi la machine-outil et plus particulièrement sa broche. Il y a donc une recrudescence de la demande pour des systèmes de Surveillance d'Usinage.

D'après une étude menée par Inasaki auprès de nombreux industriels japonais [Ina94], la fiabilité du système de Surveillance d'Usinage et celle des informations qu'il fournit, représente la principale attente des utilisateurs (pour plus de 80% des industriels interrogés). La fiabilité est même à leurs yeux plus importante que la rentabilité économique du système (rapport entre le coût d'achat, d'installation et d'utilisation du SSAU d'une part, et les bénéfices qu'il a apporté). En effet, un système qui n'est pas fiable va déclencher de nombreuses alarmes abusives qui vont stopper la production et nécessiter l'intervention de l'opérateur. Ce dernier va se rendre compte de l'erreur et relancer l'usinage. Mais la fabrication de certaines pièces peut durer plus d'une journée et continuer en dehors des heures d'ouverture de l'entreprise, comme par exemple lors de l'usinage d'empreinte en carbone pour l'électroérosion [Tan05]. L'opérateur ne pourra pas être présent pour relancer la production. Dans ce cas, le SASU est un frein, il va faire perdre du temps. L'opérateur va alors rapidement cesser d'utiliser un tel système et le laissera éteint en permanence. Les SASU doivent donc être totalement fiables.

Les utilisateurs souhaitent avant tout que le système garantisse que le process de fabrication se déroule correctement. La qualité des pièces fabriquées est alors garantie. En outre, les performances de la machine-outil peuvent être pleinement utilisées car le système protège la machine en cas d'incident. La productivité peut ainsi être améliorée.

Les gains escomptés par les utilisateurs sont donc une amélioration de la stabilité du process, une détection des bris d'outil, une réduction des temps de non-production et un usage optimal des outils coupants [Byr95]. Pour cela, le système devra répondre au point suivant :

- Une fiabilité opérationnelle maximale
- Une capacité d'intégration dans un grand nombre de systèmes de production (notamment l'aptitude à dialoguer avec la Commande Numérique)
- Une grande robustesse

- Un temps de réponse rapide
- De faibles coûts d'installation
- Une installation aisée sur des systèmes de production déjà existants
- Une interface avec l'utilisateur conviviale avec peu de réglages à effectuer
- Un faible encombrement
- Peu de maintenance

Si plusieurs de ces points relèvent du système physiquement implanté dans la machine, la fiabilité et la robustesse concernent la partie algorithmique du système. Comme nous allons développer une nouvelle méthode de Surveillance d'Usinage dans les chapitres suivants, nous allons toujours comme objectif de garantir, autant que faire se peut, ces deux points.

Dans le cas du fraisage, plusieurs types d'événements sont surveillés afin de garantir la stabilité du processus de fabrication :

- Les collisions
- L'absence de la pièce ou de l'outil
- Un bridage défectueux
- Les vibrations (ou broutement)
- L'usure des dents
- Le bris d'outil (sur des fraises de très faible diamètre)
- Le bris d'une dent
- Le bris d'une arête de coupe
- L'écaillage d'une dent
- ...

Les 3 premiers événements relèvent du processus de fabrication pris dans son ensemble ; ils sont plus faciles à détecter et ne seront pas étudiés ici. Il en est de même pour le bris d'outil (fraise cassée n'ayant plus du tout de parties actives). Notons qu'il peut néanmoins être confondu avec une phase de sortie matière. Les autres incidents sont par contre des événements plus fins et plus difficiles à détecter de façon fiable. Nous allons donc nous y consacrer. Nous allons focaliser notre étude sur la détection d'endommagement des dents de l'outil. Il s'agit d'événements brefs

et de faible intensité. Néanmoins ils peuvent avoir des conséquences importantes car ils entraînent généralement des dégradations successives de l'outil qui peuvent engendrer un incident majeur, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant. Les vibrations et l'usure seront évoquées dans le 5^e chapitre. Cependant l'aspect temporel de ces 2 événements est différent de celui de l'endommagement des dents et par conséquent les méthodes de détection seront différentes.

Nous souhaitons combler le manque de fiabilité des systèmes de Surveillance d'Usinage pour les productions flexibles. Une première étape consiste à répondre à ce besoin pour les opérations d'ébauche, voire de demi-finition. Ce travail y est consacré. Les opérations de finition n'ont plus pour but d'avoir un taux d'enlèvement de matière maximal mais de garantir la qualité de la pièce réalisée. L'objectif est différent, la coupe est différente et donc la façon de surveiller cette opération différera. C'est pourquoi les opérations de finitions ne pourront être traitées dans cet ouvrage.

2.2. L'endommagement d'une dent de l'outil

Le bris d'une dent de l'outil, de ses arêtes de coupe ou son écaillage est un événement qui ne peut être prédit, contrairement à l'usure ou aux vibrations par exemple. Comment savoir, 3 secondes auparavant, que l'outil va rencontrer un point dur dans la matière, qui va cette fois-ci endommager l'une de ses dents ; alors que les précédents points durs les avaient épargnées ? Il n'est pas possible de prédire et d'anticiper ce type d'événement.

Par contre, un objectif pertinent et réaliste consiste à détecter de faibles dégradations de l'outil. En effet, la dent qui suit une dent endommagée, doit alors effectuer un travail supplémentaire et son arête risque à son tour de s'effondrer. Une fois que toutes les dents se sont brisées une à une, c'est le corps de la fraise qui va « usiner » et la broche peut alors être sévèrement endommagée, tout comme des éléments de glissière de la machine et les éléments de pilotage des axes (enfin, la pièce a de fortes chances de finir au rebut). Un système de Surveillance d'Usinage doit donc permettre de détecter, de façon fiable et rapide, de faibles endommagements ou dégradations des outils coupants ; afin de pouvoir réagir avant que d'autres dégradations en chaîne ne surviennent sur les autres dents de l'outil et rompre ainsi ce cercle vicieux. Il devient alors possible d'intervenir AVANT que des dégâts importants n'aient lieu. Cela permet alors de garantir la pérennité du process de fabrication et de répondre aux attentes des utilisateurs.

Le bris d'une dent n'est pas aussi critique qu'une collision qui doit être détectée le plus rapidement possible ; les meilleurs systèmes actuels réagissant après 0,1 ms [Mul02]. On s'autorisera ainsi de détecter un incident avec un retard de quelques tours de broches afin de privilégier des détections plus fines et plus fiables. A titre d'exemple, le système WattPilote de Digital Way détecte un bris (au mieux) en 5 ms [Dig02]. Plusieurs tours sont en effet nécessaires. En ne considérant qu'un quart de tour de la broche, si les efforts générés par une dent diminuent, il est difficile d'affirmer de façon fiable que cela est dû à un écaillage, alors que l'outil est peut être simplement en train de sortir de la matière. C'est pourquoi un retard du déclenchement de l'alarme et donc un retard de la réaction du système de Surveillance d'Usinage, est acceptable sur quelques tours de broches. Ce compromis n'empêche en rien d'associer un 2^e critère plus réactif pour détecter des incidents plus grossiers (tout en conservant une bonne fiabilité bien entendu).

En outre, la coupe d'une dent partiellement endommagée est irrégulière et la qualité de la surface de la pièce réalisée est dégradée. En ébauche, c'est généralement peu important, tant qu'un taux d'enlèvement de matière important peut être garanti sans endommagement majeur de l'outil. Par contre, cela doit être considéré pour des opérations de demi-finition ou finition.

L'objet de cette étude sera donc de détecter de faibles endommagements des parties coupantes de l'outil ; afin de prévenir, de manière fiable, des dégradations majeures du process de fabrication.

3. Conclusions et perspectives

Le début de ce chapitre a été consacré à l'étude de critères de Surveillance d'Usinage issus de la bibliographie, pour lesquels les caractéristiques de la coupe en fraisage ont été intégrées dès leur développement. En effet, l'outil possède plusieurs dents et la coupe est discontinue. La surveillance est donc plus complexe et les caractéristiques de la coupe doivent être prises en compte. On retiendra particulièrement que chacune des dents doit être suivie individuellement afin de pouvoir détecter avec davantage de fiabilité l'endommagement de l'une d'elles. Nous avons poussé ce concept jusqu'à représenter graphiquement chaque dent individuellement (au travers des valeurs des critères).

On notera également la simplicité des critères. En effet, les signaux mesurés expérimentalement contiennent de nombreuses informations mais seul un petit nombre présente une information robuste sur l'état de l'outil. L'utilisation des caractéristiques (mécaniques) de la coupe aide à la pertinence du choix de l'information à extraire des signaux. Lors de la confrontation du critère à des expérimentations dans des conditions industrielles, d'autres problèmes apparaîtront et viendront augmenter le degré de complexité de la méthode. Un critère avec trop de paramètres à régler, risque de ne plus être viable et de s'avérer peu flexible ; c'est-à-dire présenter une mauvaise capacité d'adaptation à de nouvelles configurations d'usinage. Il convient donc de choisir un critère le plus simple et le plus représentatif possible de l'état de l'outil.

Les critères étudiés ici cherchent à détecter précisément l'instant où un incident a lieu. La principale difficulté rencontrée est alors de distinguer correctement si une variation des efforts de coupe est réellement due à un incident ; ou si elle est due au battement radial des dents (de par lequel certaines dents vont enlever davantage de matière) ou encore à des changements de conditions de coupe (comme lors de virages par exemple). Bien sûr, seul dans le premier cas, le système de Surveillance d'Usinage doit intervenir. Ces critères semblaient prometteurs mais nécessitaient davantage d'expérimentation car ils avaient seulement été testés sur de simples passes rectilignes et avec des conditions de coupe très faibles.

Une étude analytique des critères retenus, a été réalisée via une modélisation des efforts de coupe. Elle a montré que les critères devaient être sensibles à des variations de l'avance et de l'engagement radial au cours de l'usinage. Une pièce test, constituée d'une poche ouverte, a été usinée afin de confirmer ce résultat expérimentalement. Au cours des essais, les efforts de coupe ont été mesurés afin de calculer les valeurs des critères. De plus, les codeurs d'axes ont

également été mesurés afin de connaître la vitesse d'avance et l'engagement radial de l'outil réels à chaque instant. Ceci nous a permis une analyse plus fine de variations des critères.

En appliquant les critères en l'état, il s'est avéré que de nombreuses détections abusives auraient été déclenchées. En effet, lorsque certaines dents ne participent pas la coupe (comme lors de virages avec rebroussement ou de phases d'entrée ou de sortie matière), les valeurs des critères dépassent les seuils de détection de bris, alors qu'aucun incident n'a eu lieu lors des essais. Ces critères sont donc sensibles aux conditions de coupe, contrairement à ce que suggéraient leurs concepteurs. De plus, des événements bénins, tels qu'un recyclage de copeau, auraient également déclenché des alarmes intempestives.

Or, la fiabilité est la principale attente des utilisateurs de systèmes de Surveillance d'Usinage. En l'état, ces critères ne conviennent donc pas. En effet, s'attacher à détecter uniquement l'instant où un incident a lieu s'est avéré peu robuste. Il semble donc que davantage d'informations doivent être prises en compte, à savoir l'état de l'outil avant et l'état de l'outil après. Nous nous proposons de développer une nouvelle méthode, plus fiable, pour la détection de faibles endommagements de l'outil. Nous avons vu qu'il n'est pas possible de prédire quand surviendra un bris ; mais que, par contre, il est envisageable de chercher à détecter de faibles endommagements des dents de l'outil, afin de pouvoir réagir avant que l'incident ne devienne trop sévère. La méthode proposée s'attachera donc à détecter, avec le plus de fiabilité, de faibles dégradations des parties coupantes de l'outil.

Chapitre III : Une nouvelle méthode : la Surveillance d'Usinage Intermittente

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence les faiblesses des principaux critères de Surveillance d'Usinage. En effet, il est difficile de distinguer correctement la source de chaque variation des efforts de coupe, puis de réussir à isoler celles relatives à une dégradation de l'état de l'outil. Ainsi, les méthodes actuelles ne sont pas fiables, bien que ce soit la principale attente des utilisateurs.

C'est pourquoi, contrairement aux méthodes traditionnelles, nous n'allons pas chercher à détecter uniquement l'instant où un incident a lieu (au travers de la signature particulière que cet incident va laisser sur les efforts). Mais nous allons suivre l'historique de l'état de l'outil, depuis le début de l'usinage, afin de pouvoir détecter si son état s'est dégradé ou non. Cette fonction « mémoire » permettra de mieux apprécier les dégradations successives des dents de l'outil. Pour plus de fiabilité, la surveillance sera suspendue lorsque la coupe n'est pas stable. Nous introduisons ainsi une nouvelle approche : la Surveillance d'Usinage Intermittente. Un critère adéquat sera proposé : l'état de l'outil sera caractérisé par une estimation du battement radial de ses dents, calculée à partir des efforts de coupe. Ce critère résultera d'un couplage entre des expérimentations et un modèle d'effort de coupe. Ceci constituera la première étape du développement de notre méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente.

Des expérimentations valideront cette approche, par des détections fiables de bris de plaquette sur une large gamme de conditions de coupes. Néanmoins, quelques limitations de la méthode seront constatées. Nous les identifierons alors, en vue d'apporter au chapitre suivant des améliorations permettant d'étendre les possibilités de la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente. Il s'agira alors de la seconde étape du développement de notre méthode. Mais avant d'anticiper, voyons tout d'abord la première étape du développement de la méthode.

1. Principe

Les Commandes Numériques actuelles ne s'occupent que des déplacements de l'outil dans l'espace de travail ; elles n'ont pas la capacité de juger du bon déroulement du process et de détecter des incidents. Pour cela, l'information fournie par des capteurs pendant l'usinage, est nécessaire. Différentes grandeurs physiques peuvent être mesurées comme nous l'avons vu au Chapitre I. Nous nous concentrerons dans un premier temps sur les efforts de coupe car ils permettent une observation directe et précise des actions mécaniques, conséquences de l'énergie mécanique nécessaire et mise en jeu lors de l'enlèvement de la matière par l'outil. Différentes voies sont alors envisageables pour analyser ces mesures d'efforts dans le but de détecter une dégradation de l'état de l'outil.

On sait que le bris partiel d'une dent de l'outil, est un incident bref. Afin de le détecter, le plus naturel est donc de suivre les signaux mesurés en recherchant une brusque variation. C'est pourquoi de nombreux auteurs cherchent à détecter l'instant où un incident a lieu, ou bien la signature particulière de l'incident. Or, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, d'autres événements peuvent également faire varier les efforts brusquement, sans pour autant qu'un incident n'ait eu lieu (changement de conditions de coupe, recyclage de copeau, ...). Dorénavant, lorsque les efforts varient soudainement, nous parlerons de zones de coupe transitoire. A contrario, nous parlerons de zones de coupe stable, lorsque les efforts de coupe moyens ne varient pas (ou très faiblement) entre plusieurs tours de broche. Il s'agit donc de zones où les conditions de coupe ne varient pas. Précisons que cette notion n'inclut pas, pour l'instant, la stabilité au sens du broutement.

Parmi les nombreuses raisons qui peuvent être à l'origine d'une zone de coupe transitoire, certaines vont nécessiter l'intervention du système de Surveillance d'Usinage pour adapter ou stopper le process :

- le bris de l'outil
- le bris d'une dent
- l'écaillage d'une dent
- le bris d'une arête de coupe
- une usure excessive
- du broutement
- une collision
- un défaut de serrage de la pièce
- ...

Par contre, d'autres raisons ne justifient en rien l'intervention du système de Surveillance d'Usinage et nuisent à la productivité, car l'usinage doit continuer son cours :

- variations brusque de l'engagement de l'outil (phases d'entrée ou de sortie de la matière, franchissement de virages ; ou encore lorsque l'outil rencontre une marche, une rainure, un perçage, ...).
- non-homogénéité de la matière de pièce (présence d'inclusions, variation locale des caractéristiques mécaniques, cristallographiques ou du fibrage, ...).
- problèmes liés à la coupe : copeau adhérent, arête rapportée, micro soudage, mauvaise évacuation des copeaux entraînant leur recyclage.
- variations dimensionnelles des pièces brutes (présence d'un point d'injection à la surface d'une pièce moulée, ...).
- ...

Interpréter correctement chacun des cas au seul vu des signaux d'efforts semble particulièrement ardu. Nous avons pu le constater lors du chapitre précédent, où les zones de coupe transitoire étaient sources de bien trop nombreuses détections abusives. C'est pourquoi plutôt que de détecter l'incident en tant que tel, nous proposons de détecter sa conséquence, qui est la modification de l'état de l'outil (en cas d'endommagement de l'outil). Il s'agit donc de suivre l'historique de l'état de l'outil.

Afin de s'affranchir du problème de fiabilité rencontré avec les critères étudiés au chapitre précédent, nous proposons de suspendre la surveillance lors des zones d'usinage transitoire, car elles ne permettent pas une prise de décision fiable. Par conséquent, la surveillance sera intermittente et seules les zones de coupe stable seront surveillées. Si l'état de l'outil a changé entre 2 zones de coupe stable, cela signifie qu'un incident a eu lieu et une alarme peut alors être déclenchée. Nous nommerons cette nouvelle méthode la Surveillance d'Usinage Intermittente (SUI).

En outre, un suivi de l'usure s'intègre aisément dans le cadre de la méthode proposée. L'usure de chaque dent pourra être estimée régulièrement (par un autre critère plus adapté au suivi de l'usure) au cours de la production, sur les zones de coupe stable évoquées précédemment. Néanmoins, comme l'usure correspond à une dégradation lente de l'outil, la fréquence de ces estimations pourra être moindre que lorsqu'il s'agit de détecter des bris. Par exemple, l'usure pourrait être estimée sur des zones de coupe stables où les conditions de coupe sont identiques,

toutes les 30 s environ. La fonction « mémoire » de la méthode permettra alors d'apprécier l'évolution progressive de l'usure. Par ailleurs, nous étudierons au chapitre IV, l'effet de l'usure sur nos estimations de l'état de l'outil.

Nous avons vu à la fin du chapitre précédent qu'il n'est pas possible de prédire quand un endommagement de l'outil (écaillage,...) surviendra mais que, par contre, il est envisageable de détecter de faibles dégradations de l'outil pour intervenir avant que l'incident ne devienne majeur. Nous avons vu également que l'on peut disposer de plusieurs tours de broches pour détecter cela, car ce type d'incident est moins critique qu'une collision qui doit être détectée immédiatement. Lors de franchissements de virages, les zones de coupe transitoire sont relativement courtes : quelques dixièmes de secondes (cf. figure 49, chapitre II page 78). Il est ainsi concevable d'attendre la fin de celles-ci avant de prendre une décision, fiable, quant à l'état de l'outil sur la zone de coupe stable qui lui succède. Le concept de Surveillance d'Usinage Intermittente est donc tout à fait cohérent avec l'objectif que nous nous sommes fixés. La réaction reste plus rapide que celle de l'opérateur, que l'on peut situer au mieux entre 0,5 et 2s. Notons que si, dans un premier temps, la surveillance est restreinte aux zones de coupe stable, 90% de l'usinage de la pièce test du chapitre II seraient néanmoins surveillés (95% en écartant les phases d'entrée et de sortie matière) [Rit06a]. Ultérieurement, il sera envisageable d'étendre la surveillance aux zones où les conditions de coupe varient, tant que la robustesse du système n'est pas affectée.

Tant qu'aucun incident n'a lieu, l'état de l'outil reste le même à court terme (indépendamment de l'usure donc). L'estimation de l'état de l'outil, réalisée au travers des efforts de coupe, doit alors rester identique. Cependant, entre 2 zones de coupe stable, les conditions de coupe peuvent avoir changé (l'engagement radial par exemple). Il en résulte la contrainte suivante : les estimations de l'état de l'outil doivent être indépendantes des conditions de coupe.

Pour cette nouvelle méthode, nous avons besoin d'un critère nous permettant d'estimer l'état de l'outil à chaque instant, à partir des signaux d'efforts. Le *TFI* de Kim et Chu [Kim01] s'attache à détecter des variations des efforts de coupe uniquement et vaut toujours 1 lorsque la coupe est stable (que l'outil soit neuf ou endommagé). Il ne convient donc pas à la SUI. Quant aux critères *Bm* et *Km* de Deyuan et al. [Dey95], nous avons vu qu'ils étaient sensibles aux changements de conditions de coupe (ils varient de 140 % pour les essais présentés Tableau 3 au paragraphe suivant). Ils ne conviennent donc pas non plus.

Nous allons donc concevoir un nouveau critère nous permettant d'estimer l'état de l'outil, indépendamment des conditions de coupe. Pour cela, une approche expérimentale a été d'abord privilégiée. Nous avons donc besoin de signaux d'efforts de coupe mesurés sur des zones de coupe stable, sur une large gamme de conditions de coupe, à la fois avec un outil neuf et le même outil endommagé.

2. Expérimentations

Afin d'extraire une signature de l'outil pertinente, en vue de détecter l'endommagement des parties coupantes de l'outil, nous avons mené les expérimentations suivantes avec des outils ayant, tout d'abord, des plaquettes neuves, puis avec ces mêmes outils avec une des dents endommagée. En outre, la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente proposée analyse les zones de coupe stable, des passes rectilignes ont donc été usinées. Enfin, l'estimation de l'état de l'outil doit être indépendante des conditions de coupe, donc ces passes rectilignes ont été réalisées pour une large gamme de conditions de coupe industrielles.

Notre méthode vise à combler le manque de systèmes de Surveillance d'Usinage pour les productions flexibles. Une première étape s'adresse aux opérations d'ébauche. Lors des opérations d'ébauche de pièces massives aux formes complexes, un volume important de matière va être enlevé. Néanmoins, la vitesse de rotation de la broche N sera identique tout au long de l'usinage et l'engagement axial a_p ne variera qu'à de rares occasions entre 2 niveaux différents de la pièce. Dans le cas de la pièce test du chapitre III par exemple, N reste identique et a_p ne prend une valeur différente que lors du surfacage (qui précède l'usinage de la poche) et avant l'usinage du dernier niveau (afin de respecter la profondeur de la poche souhaitée). En outre, il est connu que les efforts de coupe évoluent linéairement avec l'engagement axial. C'est pourquoi, lors des expérimentations, nous avons choisi de ne pas faire varier ces 2 paramètres opératoires; mais uniquement l'avance et l'engagement radial. En effet, nous avons vu dans le chapitre précédent que ces 2 paramètres opératoires varient très souvent lors de l'usinage. Il est donc primordial que le critère de Surveillance d'Usinage que nous proposerons soit indépendant de ces 2 paramètres. Ainsi, ils sont les facteurs des plans complets de passes rectilignes usinées.

Au cours de ces essais, les efforts de coupe ont été mesurés par une table dynamométrique 3 composantes Kistler 9257A, située entre la table du centre d'usinage et la pièce.

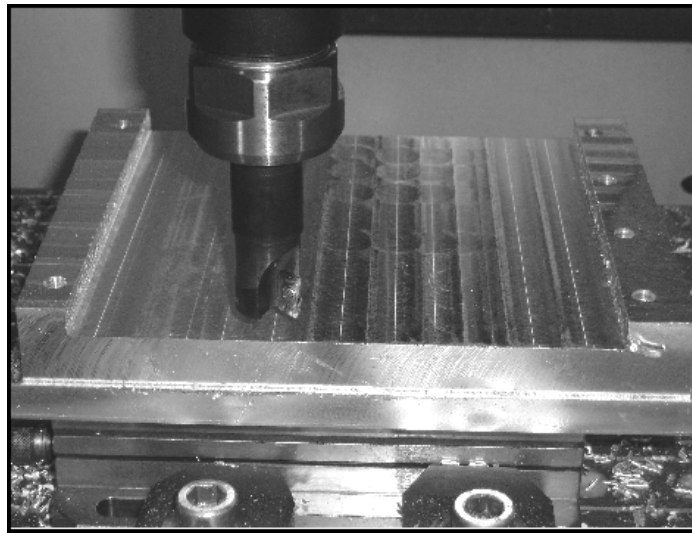


Figure 54. Dispositif expérimental.

Lors de premiers essais que nous nommerons « A », seules des plaquettes neuves ont été utilisées, le but étant de caractériser la signature d'un outil donné et de définir un critère de surveillance d'usinage, indépendant des conditions de coupe et qui permette la détection de l'endommagement d'une dent de l'outil. Un plan complet a été réalisé pour les niveaux d'avance et d'engagements radiaux présentés ci-dessous. Pour chaque combinaison, une passe rectiligne a été usinée avec chaque outil, soient 64 passes en tout.

Paramètre	Valeur
4 avances à la dent	0,08 0,12 0,16 0,2 mm/dent
8 engagements radiaux (% diamètre outil)	15, 40, 65, 100 % en opposition 15, 40, 65, 90 % en avalant
Outil à 2 dents	Fraise cylindrique de diamètre 32 mm avec 2 plaquettes (Sandvik H13A)
Outil à 3 dents	Fraise carbure monobloc de diamètre 20 mm avec 3 dents (Fraisa)
Vitesse de coupe	650 m/min
Engagement axial	2,5 mm
Matière	Alliage d'aluminium 7075
Machine outil	Cincinnati Sabre
Commande Numérique	Num 760
Fréq. échantillonnage	64 kHz

Tableau 3. Données du plan complet des expérimentations A.

De secondes expérimentations « B » ont ensuite été menées afin d'évaluer ce critère ; avec cette fois-ci, tout d'abord des plaquettes neuves, puis avec une des plaquettes endommagée. Le bec de cette plaquette a été limé afin de simuler un bris partiel. Un plan complet a été réalisé pour les

niveaux d'avance et d'engagements radiaux présentés Tableau 4 ; pour chaque outil (neuf puis endommagé, soient 364 passes usinées).

Ces essais A et B seront utilisés au cours de ce chapitre pour effectuer la première phase du développement de notre méthode de SUI et valider notre critère de détection d'endommagement de plaquettes. Notons que les signaux d'effort mesurés en X et Y sont systématiquement filtrés à 2 fois la fréquence de passage des dents, avant de calculer la résultante. Cette dernière est alors utilisée ensuite, pour extraire les pics d'efforts au passage de chaque dent par exemple.

Paramètre	Valeur
7 avances à la dent	0.04, 0.06, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2, 0.25 mm/dent
13 engagements radiaux (% diamètre outil)	0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 62.5, 75, 87.5, 100 % (en opposition)
Outil à 2 dents	Fraise cylindrique de diamètre 32 mm avec 2 plaquettes (Sandvik H13A)
Outil à 4 dents	Fraise cylindrique de diamètre 25 mm avec 4 plaquettes (Mitsubishi VP15TF)
Vitesse de coupe	500 m/min
Engagement axial	2 mm
Matière	Alliage d'aluminium 7075
Machine outil	Cincinnati Sabre
Commande Numérique	Num 760
Fréq. échantillonnage	20 kHz

Tableau 4. Données du plan complet des expérimentations B.

Nous avons choisi d'usiner des plans complets plutôt que des plans fractionnaires. En effet, l'objectif étant de développer un système de Surveillance d'Usinage fiable sur une large gamme de conditions de coupe, nous avons besoin d'une cartographie complète, portant sur des jeux de données conséquents. Cela nous a notamment permis d'écarter quelques passes de la série d'essais B qui étaient sujettes au broutement, tout en conservant un nombre important de données. En outre, dans le cas des expérimentations B par exemple, si l'on avait choisi $8f_z$ et $16a_e$ (ce qui est plus favorable aux plans fractionnaires), le calcul du PPCM nous dit que 2 fois moins de passes pourraient être réalisées (128 au lieu de 256). Cependant, le gain de temps réalisé lors des expérimentations est très faible (moins de 10 minutes par outil, car toutes les passes sont réalisées en lançant 1 ou 2 programmes d'usinage). Le dépouillement d'un plan fractionnaire est plus complexe. Ainsi, le temps gagné lors des essais est largement perdu lors du

dépouillement (et de la préparation du programme ISO) ; et surtout la cartographie est incomplète, rendant l'étude moins pertinente. D'où le choix de plans complets.

Nous allons maintenant analyser ces mesures afin de développer notre propre système de Surveillance d'Usinage. Nous allons tout d'abord chercher à reconnaître une signature discriminante des outils de fraisage, au travers des efforts de coupe qu'ils génèrent ; à l'image des « oreilles d'or » des sous-marins qui reconnaissent les autres bâtiments, au travers des sons qu'ils émettent.

3. Signature de l'outil

3.1. Effet du battement radial des dents

Nous cherchons à caractériser l'état de l'outil à chaque instant, à partir des signaux d'effort de coupe. Si l'on prend un outil avec des plaquettes neuves dans le magasin de l'atelier, un battement radial des dents de quelques centièmes de millimètres peut être mesuré lorsque l'outil est monté dans la broche de la machine. Le volume de matière enlevé par chaque dent diffère alors. Plus exactement, l'épaisseur de copeau nominale (due à l'avance et à l'engagement radial) est augmentée de la différence de battement radial entre 2 dents adjacentes [Kli83]. Comme l'épaisseur de copeau nominale est de l'ordre du dixième de millimètre, l'effet du battement est donc significatif. Par conséquent, les efforts générés au passage de chaque dent vont également différer, comme nous pouvons le constater sur la Figure 56. Pour chaque outil, une signature particulière peut donc être extraite de la résultante des efforts de coupe.

Le battement radial des dents est en partie dû au faux-rond, c'est-à-dire à l'excentration entre le centre de l'outil (mesuré au niveau des dents) et l'axe de rotation réel de l'ensemble en rotation {moyeu de la broche + corps d'outil + outil}. Ce défaut ira croissant selon les exemples d'attachement suivant : outil fretté, montage en pince, montage en weldon. A cela s'ajoutent les défauts de mise en position des plaquettes ainsi que leurs variations dimensionnelles. Ils sont généralement quantitativement plus important que le faux-rond [See99]. Ces défauts génèrent un battement radial statique. Un battement dynamique apparaît également lors de la coupe. Il est dû aux variations des efforts de coupe, au déséquilibre dynamique de l'ensemble en rotation, à des dilatations thermiques, à une progression non-uniforme de l'usure [Arm89] ou encore à des vibrations tels que le broutement auto-excité [Par04]. Notre but n'est pas ici de prédire ou minimiser ces défauts mais simplement de les constater et de les utiliser comme signature de l'outil. Néanmoins, le battement radial statique des dents a été mesuré sur chaque outil monté en broche, lors de la série d'essais C à l'aide d'une touche micrométrique Etamic, Figure 55.



Figure 55. Mesure du battement radial des dents, sur l'outil monté en broche et avec une touche micrométrique.

Un battement axial des dents peut également être constaté. Cependant, lors d'opérations d'ébauche, il est généralement négligeable devant l'engagement axial. Par exemple, si a_p vaut 2 mm et f_z 0,1 mm/dent/tr, un battement de 0,01 mm introduit, axialement, une variation de l'engagement de 0,5% alors que, radialement, l'épaisseur de copeau varie de 10%, soit 20 fois plus. Nous n'en tiendrons donc pas compte dans la suite de ce manuscrit. Par contre, si l'on souhaite appliquer la méthode proposée ici à des opérations de tréflage ou de finition avec un outil boule, le battement axial n'est plus négligeable et doit être pris en compte.

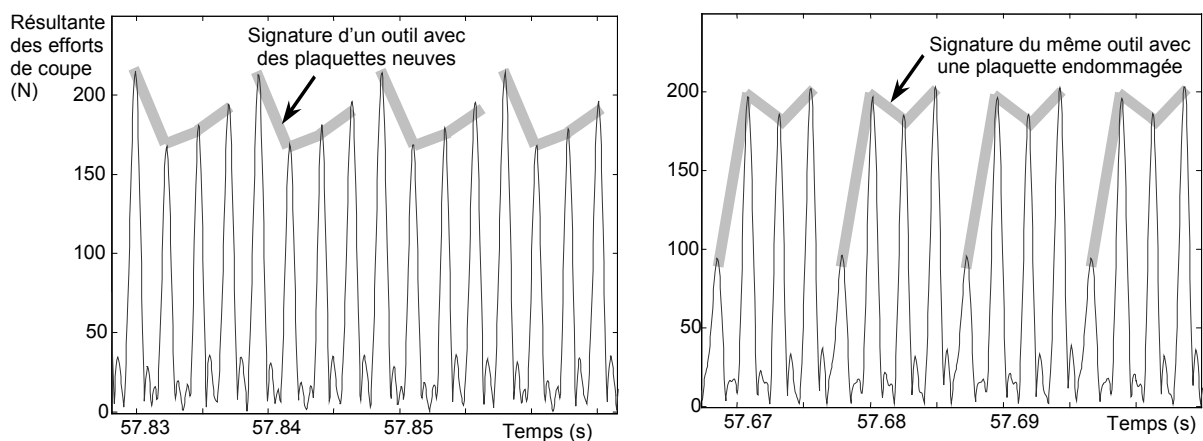


Figure 56. Signature sur les efforts de coupe, d'un outil neuf (due au battement radial des dents, à gauche) puis du même outil endommagé (à droite).
(essais B, outil à 4 plaquettes, engagement radial 10 % ϕ_{outil} , avance 0.12 mm/dent)

3.2. Effet de l'endommagement d'une dent

En cas de bris de l'une des dents de l'outil, cette dent va enlever moins de matière qu'auparavant et donc générer des efforts de coupe plus faibles. En outre, la dent suivante va devoir enlever le surplus de matière laissé par la dent brisée, et ainsi elle va générer des efforts plus importants. Par conséquent, la signature de l'outil sur la résultante des efforts de coupe va être modifiée.

En comparant les graphes de gauche et de droite de la Figure 56, on s'aperçoit que les efforts générés par les 3^e et 4^e dents sont similaires. Seules les amplitudes des efforts générés par les dents 1 et 2 sont modifiées. En effet, la dent 1 est partiellement brisée et donc la dent suivante doit enlever davantage de matière.

Il semble donc particulièrement pertinent d'extraire de la résultante des efforts de coupe, une « entité caractéristique » au passage de chaque dent, afin d'estimer l'état de l'outil. Cette entité caractéristique pourrait être le pic d'effort par exemple.

3.3. Nécessaire et suffisant

Nous avons vu au paragraphe précédent qu'extraire une entité caractéristique des efforts de coupe à chaque passage de dent devrait permettre de détecter l'endommagement d'une dent de l'outil. Cependant, extraire des données si souvent implique des contraintes fortes, au niveau du choix du capteur notamment, comme nous allons le voir dans les prochains paragraphes. Autant de données sont-elles nécessaires ou est-ce que des données moins riches seraient suffisamment discriminantes ? Nous allons répondre à cette question en testant 2 solutions moins contraignantes : les efforts moyens et les efforts maxis (calculés sur un ou plusieurs tours de broche).

En effet, extraire des données caractéristiques à chaque passage de dent nécessite une information relativement riche sur le process. Il faut que la bande passante du capteur utilisé (pour la Surveillance d'Usinage Intermittente) soit au moins égale à la fréquence de passage des dents. Sans quoi, l'information discriminante recherchée ne sera pas présente dans les signaux. Cette contrainte limite ainsi la liste des capteurs qui pourraient être candidats pour la mise en œuvre de notre méthode.

En outre, extraire une valeur à chaque passage de dent suppose de connaître en permanence quelle dent est en train d'usiner. Obtenir cette information n'est pas toujours trivial. Nous y reviendrons au chapitre IV.

Il est donc naturel de se demander si autant des données sont nécessaires et si, par exemple, extraire une seule entité caractéristique par tour de broche ne serait pas suffisamment discriminant ?

Nous avons envisagé 2 possibilités : tout d'abord les efforts moyens, puis les efforts maxis (une valeur est extraite en considérant un ou plusieurs tours de broche complets). Les passes rectilignes usinées avec l'outil à 2 dents, correspondant à 65 combinaisons d'avance et d'engagement radial de la série d'essais *B*, ont été traitées (Tableau 4).

Sur chaque zone où l'usinage est stable, la valeur moyenne ainsi que le maximum de la résultante des efforts de coupe sont extraits (Figure 57). Ces valeurs sont identiques à celles qui pourraient être calculées sur chaque tour de broche, à la variabilité du process près.

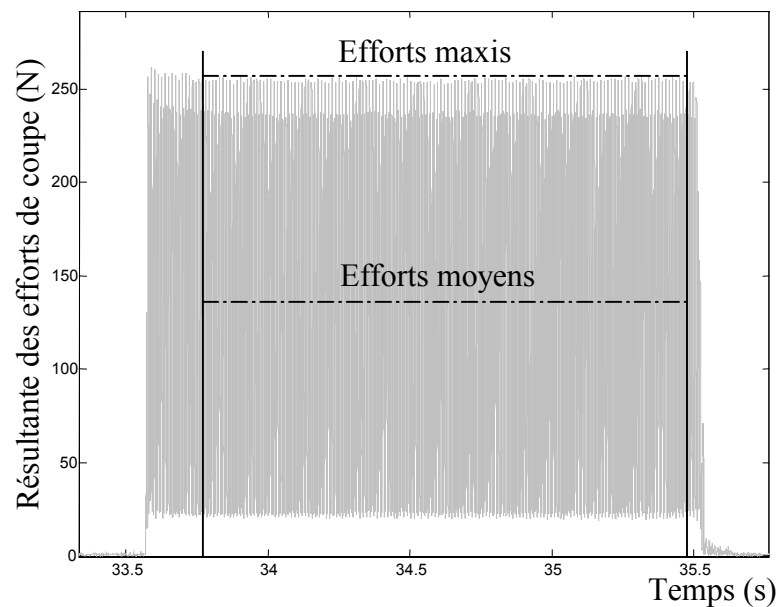


Figure 57. Efforts moyens et maxis sur une passe rectiligne.

Ces valeurs moyennes d'efforts ont ainsi été extraites à la fois pour les 65 passes réalisées lorsque l'outil possédait 2 plaquettes neuves ainsi que pour les 65 passes où une des dents était endommagée. Sur la Figure 58, chaque passe rectiligne est représentée par un nœud du maillage des surfaces grises. A l'avance et à l'engagement radial auxquels la passe a été réalisée, la valeur moyenne des efforts correspondante est reportée sur l'axe Z. Contrairement à ce que l'on aurait pu pressentir, il s'avère que les efforts moyens sont plus faibles de 5 à 15 % lorsqu'une des dents est brisée.

Par conséquent, un critère de surveillance basé sur l'entité caractéristique « efforts moyens sur un tour de broche » n'aurait rien pu détecter. Notons que les plaquettes neuves ont un rayon de bec de 0,8 mm et que le bris a été produit à l'aide d'une lime diamant sur 1 mm environ. Comme l'angle de coupe de la plaquette limée est resté positif (comme lors d'un écaillage), il n'y a donc pas eu d'augmentation significative des efforts. L'acuité a peut-être même été améliorée, ce qui pourrait expliquer la légère diminution du niveau d'effort moyen.

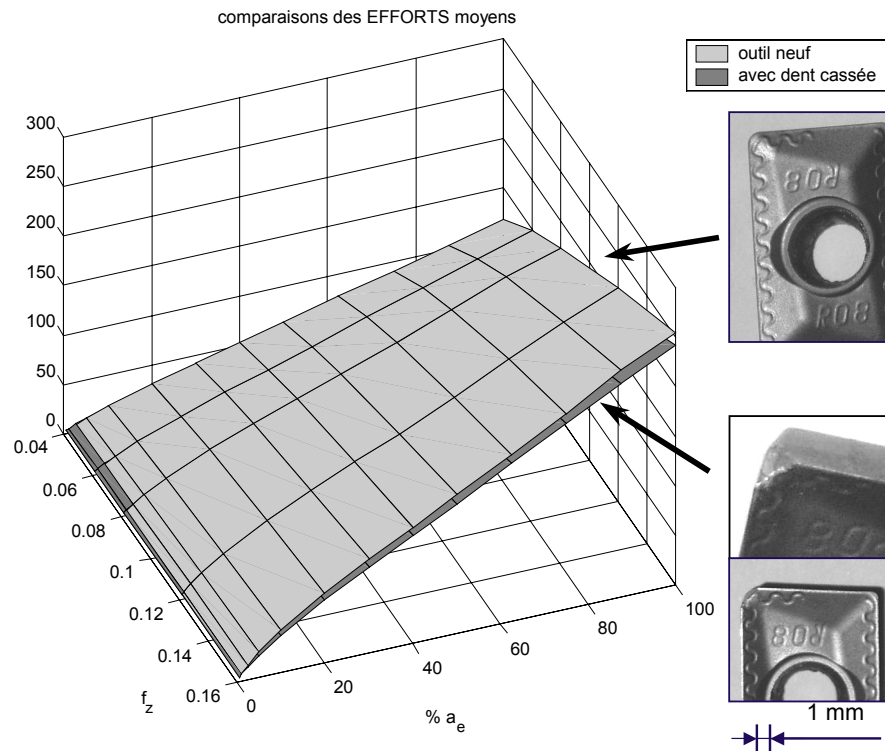


Figure 58. Comparaison des efforts moyens mesurés sur des passes avec outil neuf ou endommagé.

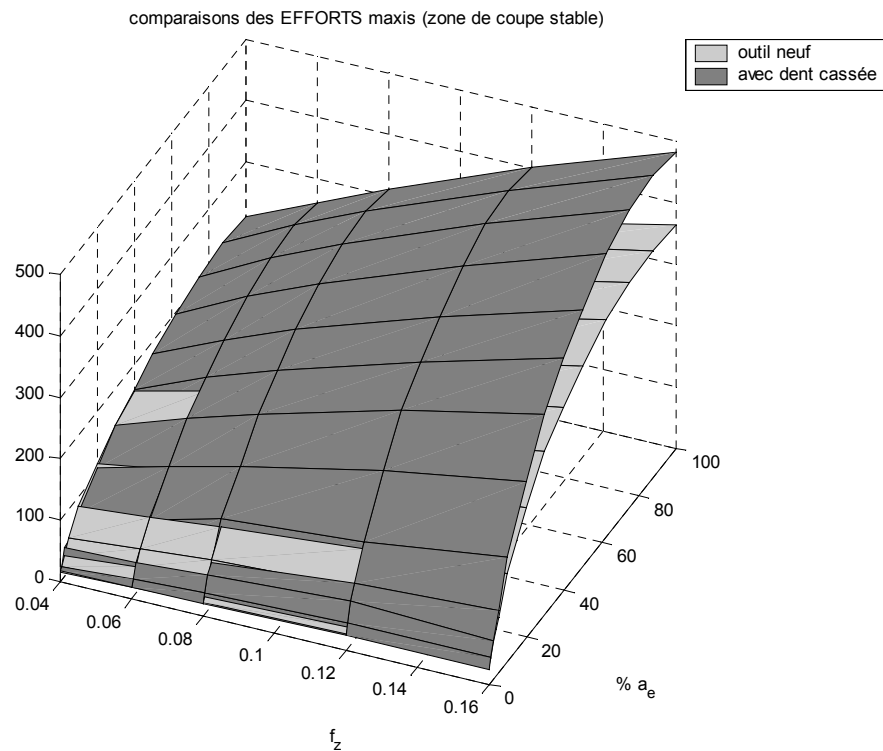


Figure 59. Comparaison des efforts maxis mesurés sur des passes avec outil neuf ou endommagé.

La Figure 59 présente, sur l'axe Z, les résultats obtenus lorsque la valeur des maxis des efforts est extraite sur un ou plusieurs tours, pour ces mêmes passes rectilignes. Quand une dent est brisée, les efforts maxi sont plus importants de 30 % en moyenne lorsque l'engagement radial a_e est supérieur à 40 % du diamètre de l'outil, ce qui permettrait la détection du bris. Cependant, en dessous de a_e 40 %, ils peuvent être inférieurs. On ne peut donc pas s'y fier. En outre, si l'on considère le bris provoqué sur l'outil à 4 dents qui est présenté sur la Figure 56, on s'aperçoit également que le maximum des efforts (calculé sur un tour de broche complet) est inférieur après le bris. Plus généralement, on risque de ne pas pouvoir détecter un bris si le battement radial est important lorsque les plaquettes sont neuves. L'entité caractéristique « efforts maxis sur un tour de broche complet » n'est donc pas suffisante pour décrire pertinemment l'état des dents de l'outil. Son utilisation pour détecter l'endommagement de dents de l'outil n'est pas fiable.

Les entités caractéristiques extraites à chaque tour de broche que nous avons testées dans ce paragraphe ne sont pas suffisamment discriminantes, il est donc nécessaire d'extraire une entité caractéristique à chaque passage de dent afin de détecter l'endommagement des dents de l'outil. Or, d'après le paragraphe précédent, cela semble suffisant. A priori, nous avons donc trouvé le juste milieu : extraire une entité caractéristique à chaque passage de dent est nécessaire et suffisant.

3.4. Conclusions préliminaires

En somme, nous avons vu que ni les efforts moyens ni les efforts maxis calculés sur un ou plusieurs tours de broche complets ne permettent une détection fiable de bris de plaquette. Plus généralement, extraire une entité caractéristique par tour de broche n'est pas suffisamment discriminant.

Il s'avère nécessaire d'extraire une entité caractéristique à chaque passage de dent. Cela permet alors de suivre l'évolution de l'état de l'outil, comme nous le suggèrent la Figure 56. Dans un premier temps, une seule entité caractéristique sera extraite au passage de chaque dent, car cela semble suffisant. Si ce choix ne s'avère pas assez robuste, davantage d'informations seront alors prises en compte dans un second temps, comme par exemple la forme du signal.

Considérons maintenant la Figure 49 du Chapitre II page 78. On s'aperçoit qu'au cours de l'usinage de la poche et du franchissement des virages notamment, les écarts entre les pics d'efforts (extraits de la résultante, sur le 5^e graphe) varient très peu ; alors que les valeurs de crêtes-à-creux sont beaucoup plus sensibles aux variations de l'engagement radial (3^e graphe).

Cela s'explique par les modélisations d'efforts de coupe : Ces 2 types de données sont sensibles à l'engagement radial a_e en dessous de 50% du diamètre. Par contre, lorsque l'engagement radial est supérieur à 50% du diamètre, le maximum de l'épaisseur de copeau nominale vaut toujours l'avance à la dent (car $\max\{\sin \varphi\}=1$), d'où des pics d'efforts théoriquement égaux. Par contre, plus a_e augmente, plus souvent les dents sont engagées simultanément dans la matière, d'où des minima d'efforts plus importants. Les valeurs de crêtes-à-creux sont donc de surcroît sensibles aux variations de a_e au-delà de 50% du diamètre. Il est donc préférable d'extraire, comme entité caractéristique, des pics plutôt que des valeurs de crêtes-à-creux.

Si l'on choisit de caractériser l'état de l'outil à partir des pics d'efforts générés au passage de chaque dent ; en observant la Figure 56, il apparaît que :

1. La signature *initiale* de l'outil (plaquettes neuves) sera principalement due au battement radial de ses dents.
2. En cas de bris, des variations importantes de cette signature seront observées, ce qui permettra la détection de l'incident.

C'est pourquoi nous allons chercher à estimer le battement radial des dents à partir des pics des efforts de coupe, mesurés à chaque passage de dent et à chaque tour de broche. Cette estimation de battement radial sera notre image discriminante de l'état de l'outil.

4. Estimation du battement radial

4.1. Etude bibliographique

Différentes approches sont abordées dans la littérature pour estimer le faux-rond outil/broche. Elles sont basées sur la modélisation des efforts de coupe qui intègre le battement radial des dents, proposée par Kline et DeVor [Kli83].

Armarego et al. [Arm89] et Gu et al. [Gu 91] proposent des approches dans le domaine temporel. Armarego et Despande suggèrent une méthode itérative faisant converger mesures expérimentales et simulations, pour identifier les paramètres. Quant à Gu, Kapoor et DeVor, la formulation est implicite. Ces méthodes nécessitent donc une intégration numérique, ce qui serait difficile à mettre en œuvre en temps réel, sur un système en ligne de Surveillance d'Usinage.

Hekman et Liang [Hek97] proposent une approche dans le domaine fréquentiel. Une formulation explicite de l'amplitude et du déphasage de la composante située à la fréquence de rotation de la broche, est obtenue par convolution d'un modèle d'efforts de coupe. Des transformées de Fourier (FFT) des signaux d'efforts permettent alors de calculer cette composante à partir de signaux

d'efforts réels et d'en déduire l'amplitude et l'orientation du faux-rond. Une méthode récursive améliore ensuite cette méthode en la rendant plus favorable à une application en temps réel. Cette approche nécessite néanmoins une fenêtre glissante comprenant au moins 5 à 10 tours de broche pour la transformée de Fourier, de sorte que les estimations ne varient pas trop.

Hormis celle de Gu et al., ces méthodes permettent uniquement d'estimer le faux-rond outil/broche ; or cela est rarement suffisant, surtout si l'outil possède des plaquettes [See99]. Seethaler et Yellowley [See99] proposent une approche dans le domaine fréquentiel permettant d'estimer le battement radial de chaque dent. Elle utilise une représentation en série de Fourier de l'effet du battement radial sur l'épaisseur de copeau. Cette méthode est intéressante ; cependant, pour un même outil, les estimations de battement radial varient lorsque l'engagement radial est faible, Figure 60.

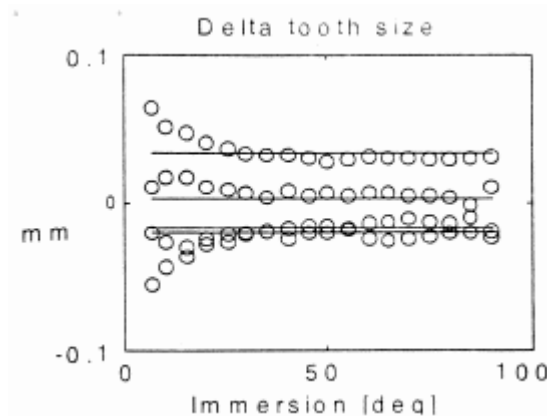


Figure 60. Estimations de battements radiaux, en fonction de l'engagement radial, par [See99].

Cependant, pour pouvoir s'intégrer dans le système de Surveillance d'Usinage Intermittente que nous proposons, le critère qui caractérise l'état de l'outil doit être indépendant des conditions de coupe.

En outre, comme pour [Hek97], la méthode requiert une fenêtre correspondant à un nombre de tours de broche assez conséquent pour calculer la FFT. Afin que la FFT ne traduise que l'état de l'outil après l'incident, la fenêtre de calcul doit lui succéder, ce qui implique un retard non négligeable de la détection.

Enfin, prenons l'exemple d'une pièce de structure aéronautique. Si un même outil commence une opération d'ébauche en taillant dans la masse et termine celle-ci par l'usinage de voiles minces (les nervures de la pièce), le comportement vibratoire de la pièce va évoluer au cours de l'usinage. Ainsi, les composantes du domaine fréquentielle des signaux d'efforts (que les auteurs précédemment cités utilisent pour estimer le battement des dents) ne sont pas uniquement

sensibles à l'outil mais également à la morphologie de la pièce. Cela risque de nuire à la robustesse des estimations de l'état de l'outil.

A cause de ces problèmes de fenêtre de calcul et de sensibilité à l'engagement radial et à la morphologie de la pièce, nous ne retiendrons donc pas ces approches fréquentielles et allons développer notre propre critère, permettant un calcul direct et rapide dans le domaine temporel.

4.2. Proposition d'un nouveau critère

La méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente nécessite un critère adéquat, afin d'estimer l'état de l'outil à chaque instant, à partir des efforts de coupe. Nous avons vu précédemment dans ce chapitre que caractériser l'état de l'outil par une estimation du battement radial de ses dents devrait permettre la détection d'endommagements de l'outil, du type bris partiel ou écaillage d'une dent. Pour estimer le battement radial des dents, les méthodes issues de la bibliographie ne conviennent pas pour cette application spécifique. Nous allons privilégier une approche expérimentale, dans le domaine temporel, basée sur les pics d'efforts générés au passage de chaque dent.

Pour cela, nous allons étudier l'évolution des pics d'efforts générés au passage de chaque dent, dans le but d'en extraire une signature particulière, indépendante des conditions de coupe. Les essais *A*, présentés Tableau 3, ont été traités ainsi : Pour chacun des 32 jeux de conditions de coupe (avance à la dent f_z / engagement radial a_e) du plan complet, une passe rectiligne a été usinée et les efforts mesurés. La résultante des efforts de coupe est calculée après l'application d'un filtre passe-bas. Les pics d'efforts générés à chaque passage de dent sont alors extraits, Figure 61.

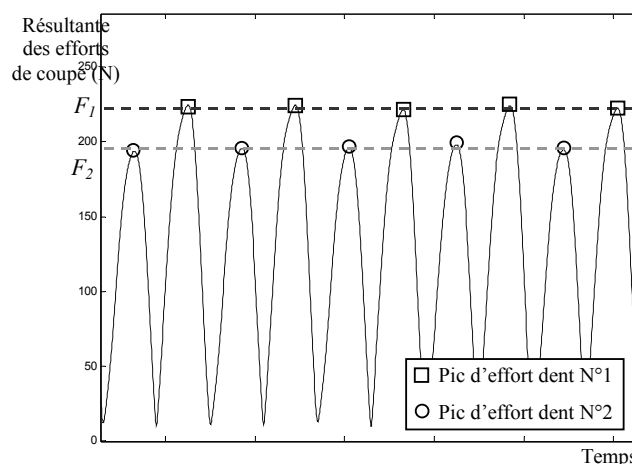


Figure 61. Extraction de l'entité caractéristique « pic d'efforts » à chaque passage de dent, pour un jeu donné de conditions de coupe.

Enfin, la valeur moyenne (sur la totalité des tours de broche), notée F_j , des pics d'effort générés au passage de la dent j , est calculée ; en considérant au minimum une centaine de tour de broche où la coupe est stable (c'est-à-dire en écartant les phases d'entrée et de sortie matière). La Figure 62 présente les résultats obtenus ; pour chaque nœud de maillage des surfaces, la valeur de pics d'efforts F_j mesurée pour la dent j et un couple (f_z/a_e) donné, est reportée sur l'axe Z. Les valeurs de pics d'efforts générés par la dent 1 sont en moyenne supérieures de 90 N à ceux de la dent 2. Cet écart est significatif, au vu l'écart type intra-échantillon qui est de 1,98 N. Remarquons que, pour chaque dent, les efforts mesurés sont (en moyenne) supérieurs de 0,5 % lors des passes en avalant, par rapport à celle usinées en opposition.

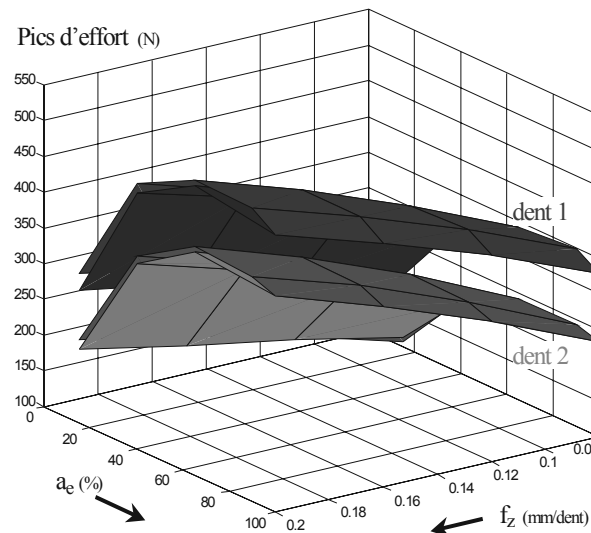


Figure 62. Pics d'effort généré au passage de chaque dent de l'outil, en fonction de l'avance et de l'engagement radial (outil à 2 dents, essais A)

L'écart de 90 N entre les 2 dents doit nous permettre d'identifier le battement radial. En effet, il est généralement admis que les efforts sont proportionnels à la section de copeau enlevée [Pri99]. En outre, Kline et DeVor précisent que les écarts par rapport à l'épaisseur nominale de copeau sont dus au battement radial relatif $\Delta\epsilon_j$, et non au battement simple ϵ_j [Kli83].

Pour illustrer cette propriété, prenons le cas d'école d'une passe de rainurage réalisée de gauche à droite (Figure 63), avec une avance à la dent de 0,3 mm/dent et un outil à 3 dents, ayant des battements simples ϵ_j (mesurés par rapport au rayon nominal de la fraise) de respectivement -0,1, -0,2 et -0,3 mm.

Faisons l'hypothèse qu'à l'instant $t = 0$, la position théorique de la dent N° 3 au maximum de matière ($\varphi = 90^\circ$) est à $x_{th}(0) = 0$. On déduit de l'avance à la dent, les positions théoriques successives des autres dents, aux prochains passages de dents t (ligne C du Tableau 5).

	N° du tour de broche		1			2			3		
A	N° de la dent	j	1	2	3	1	2	3	1	2	3
B	Passage de dents	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	Position théorique de la dent	$x_{th}(t) = f_z \cdot t$	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7

Tableau 5. Positions théoriques de l'outil.

Connaissant ces positions théoriques et le battement de chacune des dents, on en déduit leurs positions réelles (Figure 63 ; ligne E du Tableau 6).

	N° du tour de broche		1			2			3		
D	Battement simple de la dent	ε_j	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,2	-0,3
E	Position réelle de la dent	$x(t) = x_{th}(t) + \varepsilon_j$	0,2	0,4	0,6	1,1	1,3	1,5	2	2,2	2,4

Tableau 6. Positions réelles des dents.

Afin d'identifier l'épaisseur de copeau (au maximum de matière) qui est réellement enlevée par chaque dent, il nous suffit d'observer les écarts entre les positions de chacune des dents :

	N° du tour de broche		1			2			3		
F	Epaisseur de copeau maxi	$h_c(t) = x(t) - x(t-1)$	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2

Tableau 7. Epaisseur réellement enlevée par chaque dent.

Une fois le régime établi, les dents 1, 2 et 3 ont donc enlevé un copeau maximum de respectivement 0,5 ; 0,2 et 0,2 mm. A partir des valeurs de battement simple ε_j , on obtient les battements radiaux relatifs $\Delta\varepsilon_j$ valant respectivement $-0,1 - (-0,3) = 0,2$; $-0,2 - (-0,1) = -0,1$ et $-3 - (-0,2) = -0,1$. En ajoutant les $\Delta\varepsilon_j$ à l'avance à la dent nominale f_z , on obtient bien les épaisseurs de copeau obtenues graphiquement : 0,5 ; 0,2 et 0,2 (en sommant un tour de broche, on retrouve aussi que $0,5 + 0,2 + 0,2 = 0,9 = 3 \cdot f_z$ ont été enlevés au total, soit autant que le nombre de dents).

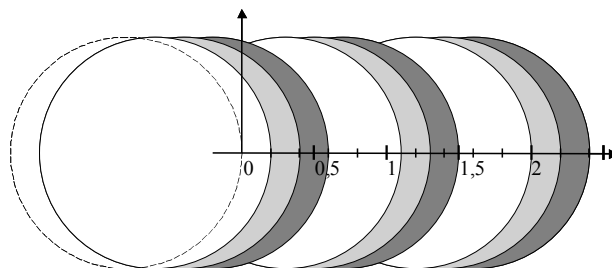


Figure 63. Epaisseur de copeau enlevée en fonction du battement radial relatif.

Selon les dents, l'épaisseur de copeau enlevée h_{c_j} varie donc bien, par rapport à l'épaisseur nominale de copeau h_c , du battement radial relatif $\Delta\varepsilon_j$ (et non du battement simple).

$$h_{c_j} = h_c + \Delta\varepsilon_j$$

Revenons à notre étude. La Figure 64 nous présente les mêmes résultats que sur la Figure 62, mais en fonction de l'avance à la dent uniquement. Les pics d'efforts F_j sont regroupés par passes réalisées à engagement radial identique (avalant et opposition étant distincts). Pour chaque dent et pour chaque engagement radial (pour chaque ligne brisée de la Figure 64 donc), on peut remarquer que les pics d'efforts évoluent linéairement en fonction de l'avance et pourraient donc être modélisés par une droite. Ces droites ne coupent pas l'axe des ordonnées en zéro. Les pics d'efforts sont donc une fonction affine de l'avance. Enfin (si l'on écarte les lignes en pointillé où a_e vaut 15%), nous pouvons constater que les pentes de ces droites sont presque identiques (elles ne varient que de 11%). Les pics d'efforts semblent donc évoluer de manière affine par rapport à l'épaisseur de copeau, avec principalement un écart d'une dent à l'autre qui pourrait s'expliquer par le battement radial des dents. Nous avons recherché une telle modélisation des efforts de coupe.

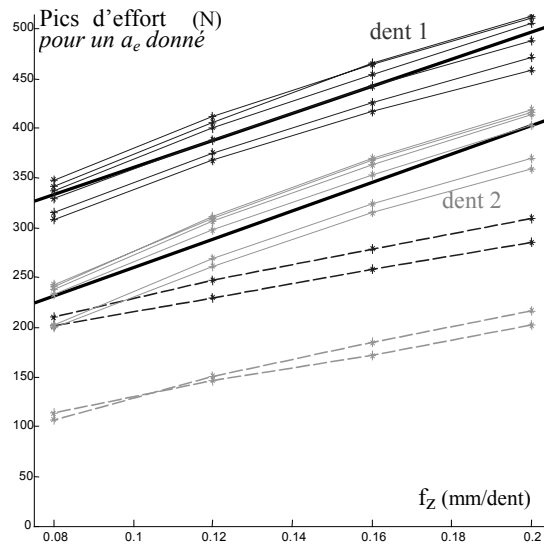


Figure 64. Pics d'efforts, fonction affine de l'épaisseur de copeau.

Le modèle d'efforts sous-jacent est alors une adaptation du modèle d'efforts proposé par Altintas [Alt01] où les efforts sont une fonction affine de l'épaisseur de copeau et où l'effet du battement radial des dents sur l'épaisseur de copeau (modélisé par [Kli83], éq. 23) est pris en compte :

$$F_j = K_c \cdot a_p (h_c + \Delta \varepsilon_j) + K_e \cdot a_p \quad 24$$

F_j est le pic de la résultante des efforts qui est généré au passage de la dent j , h_c est le maximum de l'épaisseur nominale de copeau, K_c et K_e sont des constantes relatives au couple outil-matière et $\Delta \varepsilon_j$ est le battement radial relatif de la dent j . Cette équation peut être obtenue à partir des références citées ci-dessus et sous l'hypothèse que pas plus d'une dent n'est engagée simultanément dans la matière.

Les constantes K_c et K_e sont obtenues par la méthode des moindres carrés, avec un coefficient de corrélation de $R^2=99,3\%$, à partir de toutes les valeurs moyennes des pics d'efforts pour chaque jeu de conditions de coupe. En effet, on peut déduire de l'équation 24 que, pour un jeu de conditions de coupe donné, la moyenne des pics d'efforts vaut :

$$\overline{F_j} = K_c \cdot a_p \cdot h_c + K_e \cdot a_p \quad 25$$

La relation entre le battement radial et les pics d'efforts, décrite par l'équation 24 peut alors se résumer comme suggéré sur la Figure 65.

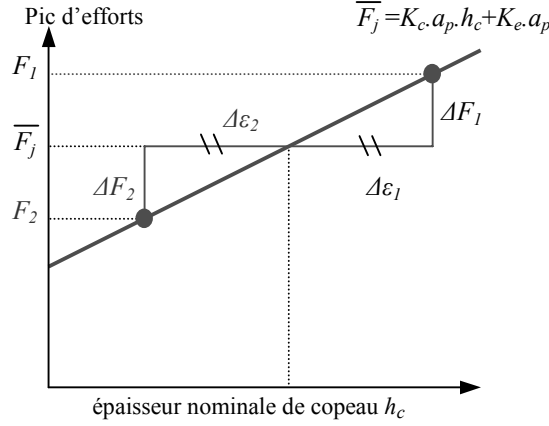


Figure 65. Relation entre le battement radial relatif et les pics d'efforts.

Pour un outil à deux dents, sans battement radial, les dents généreraient un pic d'effort moyen $\overline{F_j}$, pour une épaisseur nominale de copeau h_c . En présence de battement radial, la dent N°1 va enlever davantage de matière et générer un pic d'effort F_1 supérieur. De même, la dent N°2 va enlever moins de matière et générer un pic d'effort F_2 plus faible.

Nous pouvons donc déduire de la Figure 65 (ou des équations 24 et 25) la relation suivante :

$$\Delta F_j = F_j - \overline{F_j} = K_c \cdot a_p \cdot \Delta \epsilon_j \quad 26$$

Cette formulation du problème permet de s'affranchir de la variation du niveau des efforts en fonction de l'engagement radial et du sens d'usinage (avalant ou opposition).

Notre critère de Surveillance d'Usinage Intermittente estime alors le battement radial relatif des dents, à chaque tour de broche n , par :

$$\Delta \epsilon_j(n) = \frac{F_j(n) - \overline{F_j}(n)}{K_c \cdot a_p} \quad 27$$

La méthode présuppose que quelques passes d'étalonnage ont été réalisées au préalable afin d'identifier le coefficient K_c . L'équation 27 permet ensuite d'estimer le battement radial relatif à

chaque tour de broche n , à partir des pics d'efforts extraits de la résultante des efforts de coupe au passage de chaque dent ; et ce quelle que soit la géométrie de la pièce usinée (tant que la profondeur de passe reste la même). La simplicité du critère proposé et sa formulation explicite sont favorables à son intégration dans un système de Surveillance d'Usinage en ligne. En effet, le critère peut être calculé très rapidement, contrairement aux méthodes itératives qui sont problématiques pour des applications en temps réel. En outre, il devrait permettre de s'affranchir des changements de conditions de coupe, au vu de l'attention portée aux caractéristiques de la coupe lors de la conception du critère.

5. Premiers résultats

5.1. Sensibilité aux conditions de coupe

Reprenons les essais A et appliquons le critère à cette large gamme de conditions de coupe (l'avance varie 0,08 à 0,2 mm/dent et l'engagement radial de 15% à 100% du diamètre de l'outil, à la fois en avalant et en opposition). Pour chaque jeu de conditions de coupe, les estimations de battement radial relatif $\Delta\epsilon_j$ sont obtenues à partir des valeurs moyennes (sur une centaine de tours de broche) des pics d'efforts F_j et en appliquant notre critère (équation 27). Il s'agit donc d'une estimation moyenne de $\Delta\epsilon_j$ pour un jeu de conditions de coupe donné. La Figure 66 permet d'apprécier les variations de ces estimations $\Delta\epsilon_j$ en fonction des jeux de conditions de coupe (variations inter-échantillons, nous traiterons ultérieurement des variations intra-échantillon). La Figure 66 montre que le battement radial relatif de la dent N°1, $\Delta\epsilon_1$, est estimé à $+35 \pm 5 \mu\text{m}$. Les variations des estimations sont faibles. Il semble donc que notre critère soit peu sensible aux conditions de coupe. Rappelons que, comme l'outil n'a que 2 dents, le battement radial relatif de la dent 2 vaut l'opposé de $\Delta\epsilon_1$.

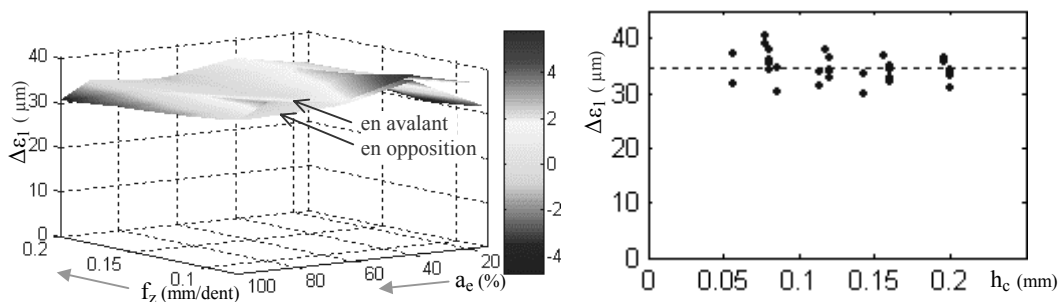


Figure 66. Estimations moyennes de battement radial relatif pour une large gamme de conditions de coupe.

Ces résultats sont donc prometteurs dans l'optique d'effectuer une Surveillance d'Usinage Intermittente. En effet, la gamme de conditions de coupe étudiée est réaliste vis-à-vis de celles rencontrées lors d'opérations d'ébauche dans des applications industrielles. Il s'avère que,

quelles que soient les conditions de coupe de la gamme étudiée, l'état de l'outil est identifié de manière identique, au travers d'une estimation du battement radial de ses dents. Ainsi les conditions de coupe peuvent changer entre 2 zones de coupe stable, le système de Surveillance d'Usinage Intermittente s'affranchira de ce changement et ne détectera que les endommagements de l'outil.

Notons tout de même que la profondeur de passe a_p doit être connue. En effet, au vu de l'équation 27, les estimations de battement radial sont fonction de ce paramètre. Néanmoins, lors d'opérations d'ébauche de pièces taillées dans la masse, a_p varie peu souvent (lors d'un faible nombre de changement de niveau de la pièce ou lors de la passe d'écroûtage). Comparativement, l'avance et l'engagement radial varient beaucoup plus fréquemment, comme nous avons pu le constater dans le chapitre précédent. Ainsi une correction des estimations vis-à-vis de a_p ne demandera que peu d'interventions.

Le critère proposé semble donc particulièrement adapté à la SUI.

5.2. Détection de bris

Afin de détecter un endommagement partiel de l'outil, la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente compare les estimations de l'état de l'outil (calculée sur les zones de coupe stable) avec son état initial. Si, sur une gamme importante de conditions de coupe d'ébauche, le critère permet d'estimer l'état de l'outil de manière identique ; il convient maintenant de vérifier qu'il permet de détecter l'endommagement d'une dent de l'outil.

Les expérimentations de la série *B* ont été réalisées dans ce but, avec l'outil à 2 dents à la fois dans le cas de plaquettes neuves et dans le cas du bris de l'une d'elles, pour une large gamme d'avances et d'engagements radiaux (Tableau 4). L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire s'adressant essentiellement aux opérations d'ébauche, les passes où l'épaisseur de copeau maxi est très faible ont été écartées dans un premier temps. Les résultats présentés dans ce paragraphe, concernent le domaine de conditions de coupe suivant : des avances allant de 0,06 à 0,25 mm/dent et des engagements radiaux entre 10 et 100% du diamètre de l'outil. A partir des passes d'étalonnage réalisées avec l'outil neuf, le coefficient $K_c = 936$ N/mm a été identifié (par la méthode des moindres carrés). Les valeurs initiales de battement radial relatif des dents, $\Delta\epsilon_1 = + 7,7 \mu\text{m}$ et $\Delta\epsilon_2 = -7,7 \mu\text{m}$, ont également été estimées à partir des passes d'étalonnage et du critère (équation 27). Elles caractérisent l'état initial de l'outil.

Pour chaque passe rectiligne du plan complet, les pics d'efforts F_j ont été extraits sur la zone où la coupe est stable, à chaque tour de broche. Notre critère (équation 27) permet ensuite d'estimer le battement radial relatif des dents $\Delta\epsilon_j$ à chaque tour de broche. Pour chaque passe, la valeur moyenne et l'étendue des variations de $\Delta\epsilon_j$ sont alors calculées. Sur la Figure 67, chaque nœud

du maillage des surfaces indique sur l'axe Z la valeur moyenne des estimations de $\Delta\epsilon_j$ obtenue pour un jeu donné de conditions de coupe. A gauche sont présentés les résultats obtenus à partir des passes usinées avec l'outil neuf ; et à droite celles usinées avec une dent partiellement brisée. Ces graphes présentent donc l'évolution des estimations en fonction des conditions de coupe (avance à la dent et engagement radial). Les différences entre les 2 graphes sont notables. Comme, après le bris, ce n'est plus la même dent qui génère les efforts les plus importants, c'est l'estimation du battement radial de la dent N°2 qui est la plus grande. Dans l'ensemble, les estimations moyennes de $\Delta\epsilon_j$ varient peu lorsque l'outil est neuf. Les variations obtenues lorsque l'outil est endommagé, important peu tant que la détection de l'incident est possible. En effet, c'est principalement lorsque l'outil est neuf que les estimations doivent être identiques, afin de pouvoir ensuite détecter de faible endommagement et éviter les fausses alertes.

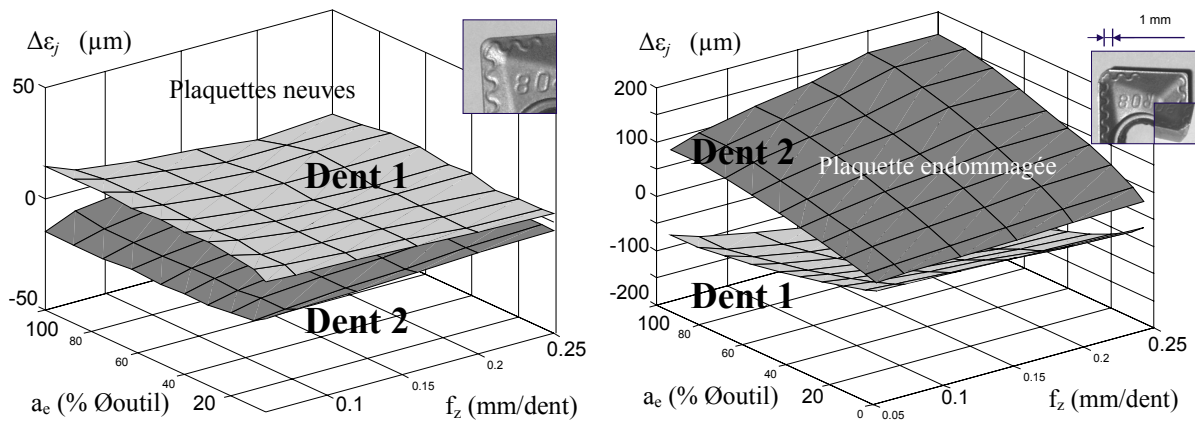


Figure 67. Estimations moyennes de battement radial relatif, outil neuf à gauche et avec une dent brisée à droite (pour une large gamme de conditions de coupe).

Nous proposons ensuite de placer des seuils de détection de bris par rapport à l'état initial de l'outil, c'est-à-dire de part et d'autre des estimations initiales de battement radial relatif. A ce niveau de l'étude, les seuils de détection de bris sont placés *a posteriori*, une fois les passes avec l'outil neuf réalisées. Au prochain chapitre, une méthode sera proposée où seules les passes d'étalonnage seront nécessaires pour fixer ces seuils. Si l'on considère qu'une passe usinée pour un jeu de conditions de coupe donné, représente un échantillon (de tours de broche). La méthode actuelle est basée sur l'étendue des variations intra et inter-échantillons.

Les variations intra-échantillon correspondent aux variations des estimations de $\Delta\epsilon_j$ entre les différents tours de broches d'une même passe. L'étendue de ces variations intra-échantillons de $\Delta\epsilon_j$ est au maximum de $\pm 5 \mu\text{m}$ ($\pm 2 \mu\text{m}$ en moyenne). Les variations inter-échantillons sont établies à partir de la valeur moyenne des estimations de $\Delta\epsilon_j$ calculée pour chaque passe. Elles correspondent aux écarts entre les estimations moyennes de $\Delta\epsilon_j$ calculées pour des jeux de conditions de coupe différents. L'étendue des variations inter-échantillons est ici de $15 \mu\text{m}$.

L'étendue totale de variation des estimations est la somme des étendues inter et intra échantillons, soit $25 \mu\text{m}$ ici. Les seuils de détection de bris peuvent donc être placés à $\pm 15 \mu\text{m}$ de part et d'autre des valeurs initiales de battement radial relatif. Si, sur une zone de coupe stable, les estimations moyennes de $\Delta\epsilon_j$ sont en dehors de ces seuils, alors cela signifie qu'une dent de l'outil a été endommagée.

Vérifions maintenant que la méthode proposée est permet de détecter correctement l'état de l'outil, quelles que soient les conditions de coupe. Dans un premier temps, plaçons les seuils de détection de bris (en trait fort) sur la Figure 68, à $\pm 15 \mu\text{m}$ de part et d'autre des valeurs initiales de battement radial relatif (en pointillés) qui valent respectivement $+7,7$ et $-7,7 \mu\text{m}$. Ensuite, reprenons les estimations moyennes de $\Delta\epsilon_j$ obtenues pour chaque jeu de conditions de coupe, présentées Figure 67. Dans un souci de clarté, les résultats ne seront non pas présentés en fonction de l'avance et de l'engagement radial, mais en fonction de l'épaisseur nominale de copeau correspondante ($h_c = f_z \cdot \sin\phi$). Les valeurs obtenues pour $\Delta\epsilon_1$ sont représentées par des ronds et celles pour $\Delta\epsilon_2$ par des étoiles. La Figure 68 montre que toutes les estimations concernant l'outil neuf se situent à l'intérieur des seuils : le système a correctement détecté que l'outil est en bon état. Par conséquent, aucune alarme abusive n'aurait été déclenchée par notre système de Surveillance d'Usinage Intermittente, quelles que soient les conditions de coupe de la gamme considérée.

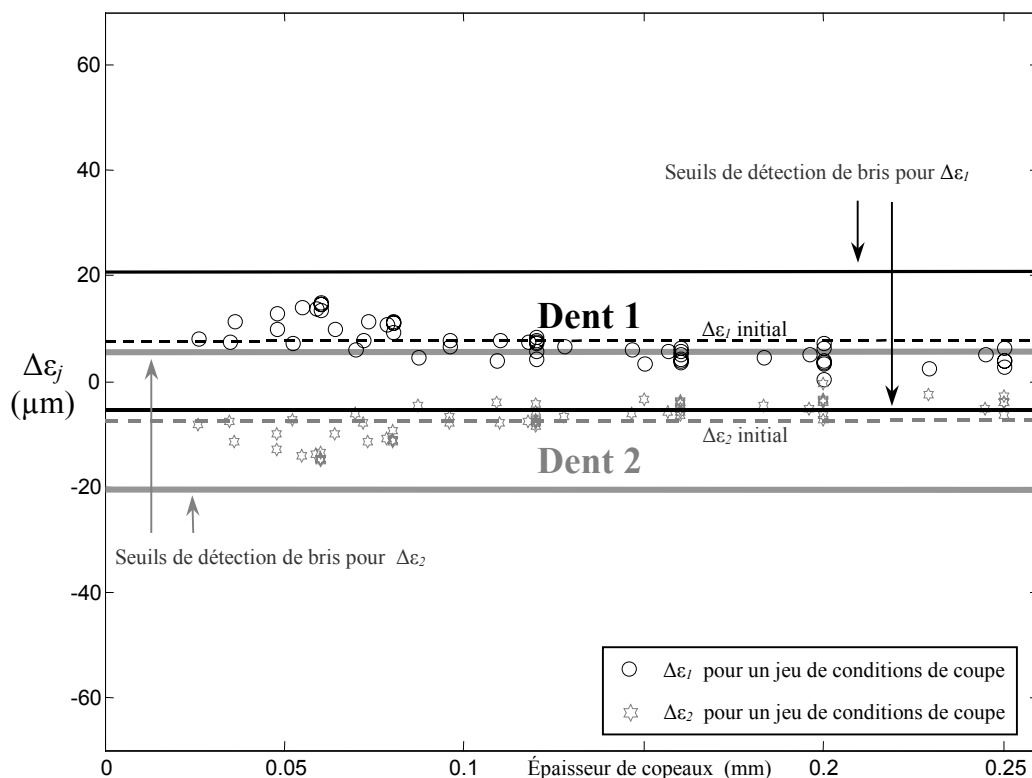


Figure 68. Comparaison des estimations moyennes de battement radial relatif par rapport aux seuils de détection de bris, avec un outil neuf.

Construisons maintenant le même graphique pour l'outil endommagé. Les mêmes seuils de détection de bris sont reportés sur la Figure 69, ainsi que les estimations moyennes de battement radial relatif, obtenues à partir des passes usinées *après* le bris de l'une des dents. La Figure 69 montre que toutes les estimations de battement radial se situent en dehors des seuils. Sur l'ensemble de la gamme de conditions de coupe considérée, le système de Surveillance d'Usinage Intermittente a donc systématiquement détecté le bris et déclenché une alarme.

Suite à son endommagement, la dent 1 enlève moins de matière et génère alors des efforts plus faibles que la dent 2. C'est pourquoi ses estimations de battement radial $\Delta\epsilon_1$ se situent en dessous des seuils de détection de bris.

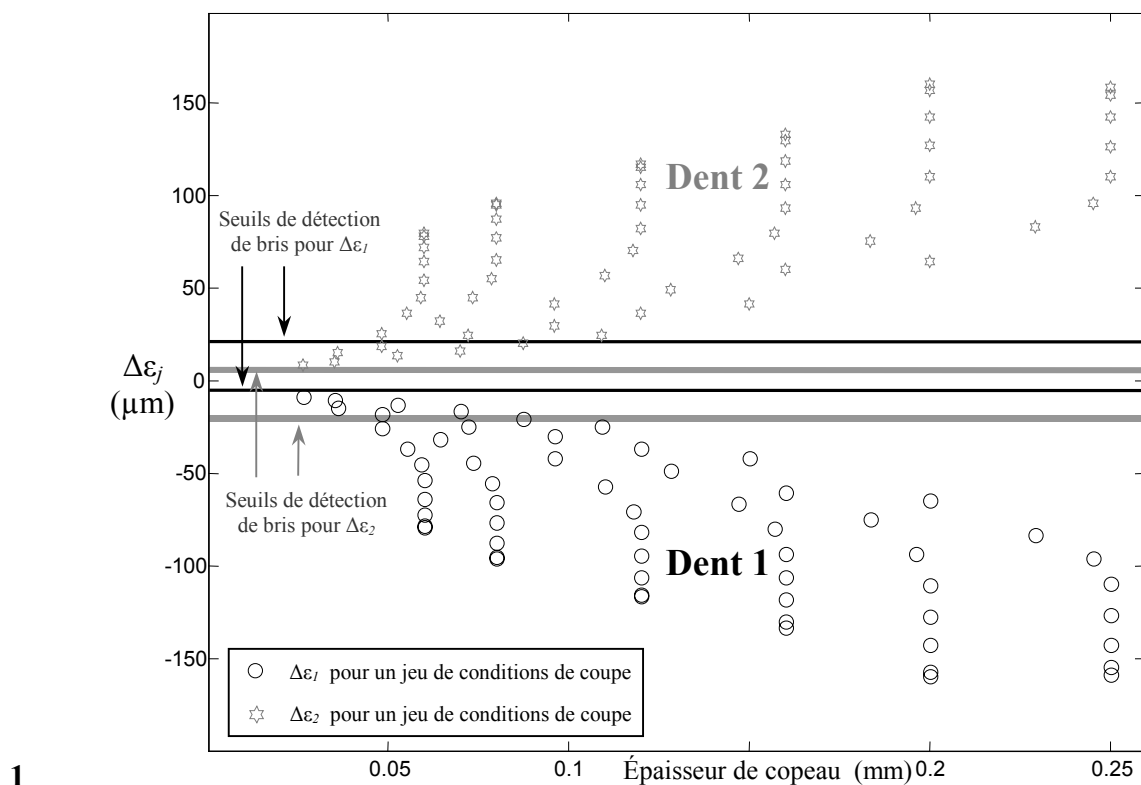


Figure 69. Comparaison des estimations moyennes de battement radial relatif par rapport aux seuils de détection de bris, avec un outil partiellement endommagé.

Par conséquent, lors de l'usinage de ces 54 passes réalisées pour des avances allant de 0,06 à 0,25 mm/dent et des engagements radiaux entre 10 et 100% du diamètre de l'outil, le système de Surveillance d'Usinage Intermittente n'a fait aucune erreur car pour l'outil neuf aucune détection abusive n'est à signaler et, en cas de bris, aucune alarme n'a été omise. Nous venons donc de montrer que, en ébauche, il est possible d'effectuer une détection de l'endommagement partiel d'une dent de l'outil qui soit fiable, même si les conditions de coupe varient fortement au cours de l'usinage. La méthode proposée jusqu'ici n'a pas besoin d'une connaissance a priori de la géométrie de la pièce qui va être usinée. Par conséquent, elle conviendrait pour effectuer une surveillance d'usinage fiable pour les productions unitaires ou à faible cadencement, lors des

opérations de fraisage d'ébauche [Rit06b]. La méthode proposée est donc une solution intéressante au cahier des charges que nous nous sommes fixé.

5.3. Application à la pièce test

En appliquant la méthode de SUI proposée à la pièce test définie au chapitre II, les résultats suivants sont obtenus :

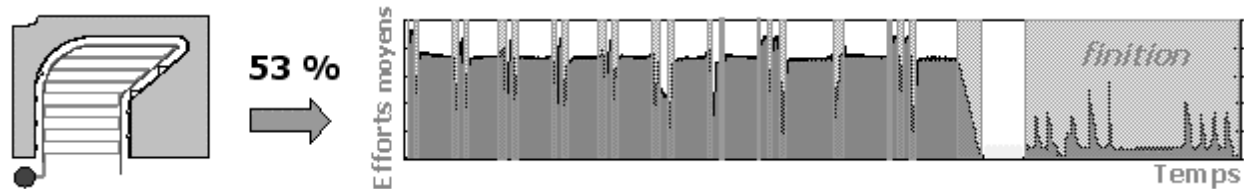


Figure 70. Surveillance d'Usinage Intermittente de la pièce test.

Tout d'abord le problème de fiabilité a été résolu car aucune détection abusive n'a été enregistrée [Rit06a]. Néanmoins, seulement 53% du temps d'usinage est surveillé. Lors de l'opération d'ébauche, les zones où la surveillance est suspendue sont courtes (de l'ordre de 0,1 s). Ainsi, un endommagement de l'outil peut être détecté aussitôt après. Par contre, en l'état, il n'est pas possible de surveiller l'usinage de la passe de finition. Si un incident survient, il ne sera détecté qu'au début de l'opération d'ébauche du niveau suivant de la pièce. L'outil risque d'être plus sérieusement endommagé entre-temps. Aussi, l'objet du prochain chapitre sera d'étendre le domaine de validité du critère afin qu'il puisse surveiller cette passe de finition.

5.4. Limites actuelles de la méthode

Au paragraphe précédent, nous venons de valider la première phase du développement de notre méthode de SUI, par des détections fiables de bris de plaquette pour un outil à 2 dents (et pour un domaine de conditions de coupe d'ébauche important). Voyons maintenant quelles sont les limites actuelles de la méthode, en la testant notamment avec des outils possédant davantage de dents.

L'objectif est de détecter de faibles dégradations des parties coupantes de l'outil, afin de pouvoir réagir avant que les dégâts ne deviennent importants (du fait de l'endommagement successif des autres dents de l'outil). La performance de la méthode repose donc particulièrement sur la précision dans la détection des incidents. Au vu de la méthode de SUI proposée précédemment, détecter de faibles endommagements revient à placer les seuils de détection de bris les plus rapprochés possibles. Ces seuils sont placés à partir des variations intra-échantillons (plusieurs tours de broche pour un même jeu de conditions de coupe) et inter-échantillons (plusieurs jeux de conditions de coupe).

Pour détecter de faibles endommagements, il convient donc de minimiser les variations inter et intra échantillons. C'est pourquoi nous allons maintenant identifier les principales sources de ces variations, afin de tâcher de les réduire au prochain chapitre.

5.4.1. Variations intra-échantillon

Une partie des variations intra-échantillons est due à la variabilité du processus de coupe. Ce facteur ne peut être maîtrisé ni minimisé, au niveau de la surveillance d'usinage. En effet, le système de surveillance d'usinage doit s'adapter au processus de fabrication d'un produit tel qu'il a été défini et non l'inverse. Il est par contre possible d'intervenir au niveau de l'acquisition et du conditionnement des signaux. Le principe des estimations de battement radial repose sur la comparaison de l'amplitude des pics d'efforts mesurés pour chaque dent. Il est donc important de faire en sorte que l'information extraite des signaux soit robuste. Or ce n'est pas toujours le cas, comme nous pouvons le constater sur la Figure 71. Après la date 5,11 s, les pics d'efforts de la dent N°3 augmentent subitement ; sans raison a priori car ni l'état de l'outil ni les conditions de coupe nominales n'ont changé.

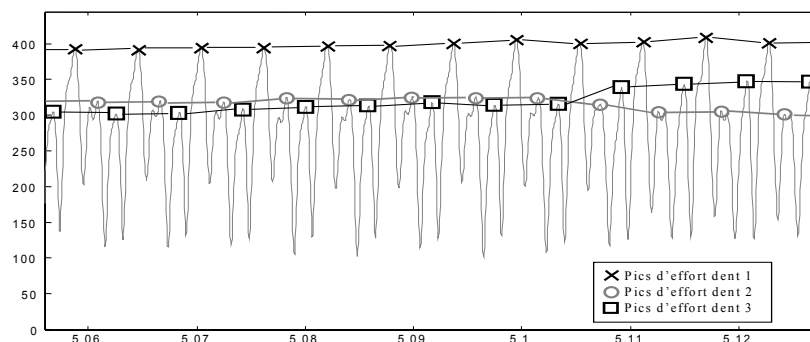


Figure 71. Manque de robustesse de l'entité caractéristique « pic d'effort ».
(essais A, outil à 3 dents, $a_e=100\%$, $f_z=0,2$ mm/dent)

Or, si les niveaux des pics d'efforts extraits sont différents, l'estimation de l'état de l'outil est également différente (alors que l'état réel de l'outil est toujours le même). Il serait donc souhaitable d'extraire des signaux d'effort une entité plus robuste que les pics d'efforts, pour le calcul de notre critère. Plus généralement, il convient de régler chaque paramètre de la chaîne de conditionnement des signaux de sorte à optimiser la robustesse des estimations de l'état de l'outil.

5.4.2. Variations inter-échantillons

Comme nous l'avons déjà écrit, la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente présuppose que le critère utilisé pour estimer l'état de l'outil est indépendant des conditions de coupe. Ces dernières peuvent changer entre 2 zones de coupe stable et s'il n'y a pas eu d'incident,

l'estimation de l'état de l'outil doit rester la même. Idéalement, les variations inter-échantillons doivent donc être nulles et on devrait obtenir des plans parallèles sur les Figure 72 à Figure 74. Cependant, si ces variations peuvent être nulles, elles doivent être le plus faible possible.

Pour les essais *A* réalisés avec l'outil à 2 dents, une étendue des variations inter-échantillons de 10 μm a été obtenue sur le domaine suivant : des avances de 0,08 à 0,2 mm/dent et des engagements radiaux de 15% à 100% du diamètre de l'outil.

Pour les essais *B* réalisés avec ce même outil à 2 dents (et un autre jeu de plaquettes), une étendue de variations de 15 μm a été obtenue sur le domaine restreint suivant : des avances de 0,06 à 0,25 mm/dent et des engagements radiaux entre 10 et 100%. Il s'agit là du domaine de conditions de coupe d'ébauche qui a été traité au paragraphe 5.2, pour la détection de bris (Figure 67). Les passes où l'épaisseur nominale de copeau est faible ($f_z=0,04$ mm/dent ou $a_e<10\%$) avaient été écartées. En restreignant ainsi le domaine de conditions de coupe sur lequel la surveillance est effectuée, des variations inter-échantillons plus faibles sont obtenues. Néanmoins, le but est de pouvoir surveiller le plus de configurations d'usinage possible, afin de suspendre la surveillance le moins longtemps possible, lors de l'usinage d'une pièce donnée.

Or, si l'on considère l'ensemble des conditions de coupe testées lors des essais *B* (avances de 0,04 à 0,25 mm/dent et engagements radiaux de 0,5 à 100% du diamètre), on peut remarquer que les variations des estimations de $\Delta\epsilon_j$ sont plus importantes lorsque l'épaisseur nominale de copeau est faible.

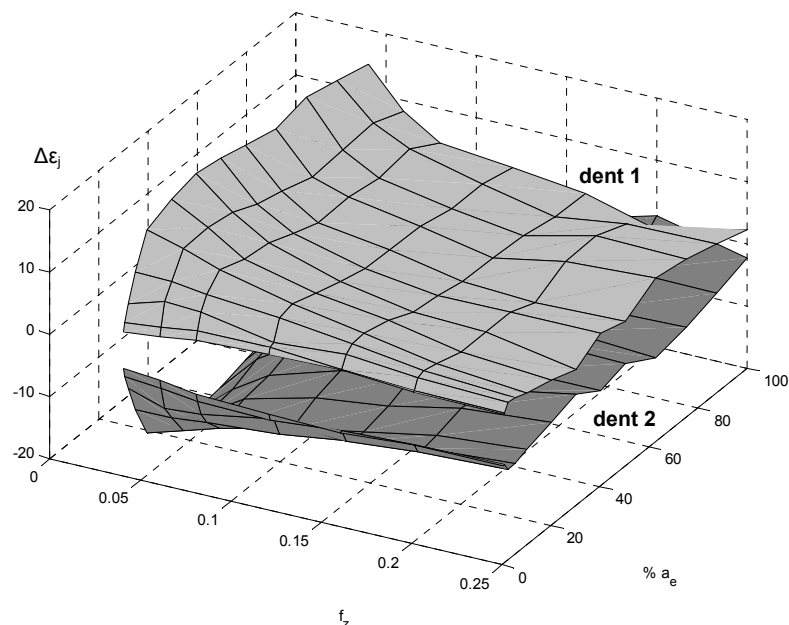


Figure 72. Estimations du battement radial relatif des dents, sur l'ensemble du domaine de conditions de coupe testé (fraise Ø32 mm à 2 plaquettes, essais *B*).

Pour l'outil à 2 dents, l'étendue des estimations moyennes de $\Delta\epsilon_j$ est de 20 μm sur l'ensemble du domaine de conditions de coupe testé (Figure 72), soit 33% de plus que sur le domaine restreint de la Figure 67. Notons que, sur cet outil là, le battement $\Delta\epsilon_j$ est faible (estimation moyenne de 7 μm) et les variations sont ici essentiellement dues à l'avance.

Sur l'outil à 3 dents, le battement radial est important : les estimations moyennes de chaque dent sont respectivement de +37, -51 et +14 μm . Nous devrions avoir 3 plans horizontaux sur la Figure 73. Les variations sont relativement faibles lorsque l'engagement radial est supérieur à 20 % du diamètre de l'outil. La SUI pourrait donc être effectuée sur ce domaine de conditions de coupe.

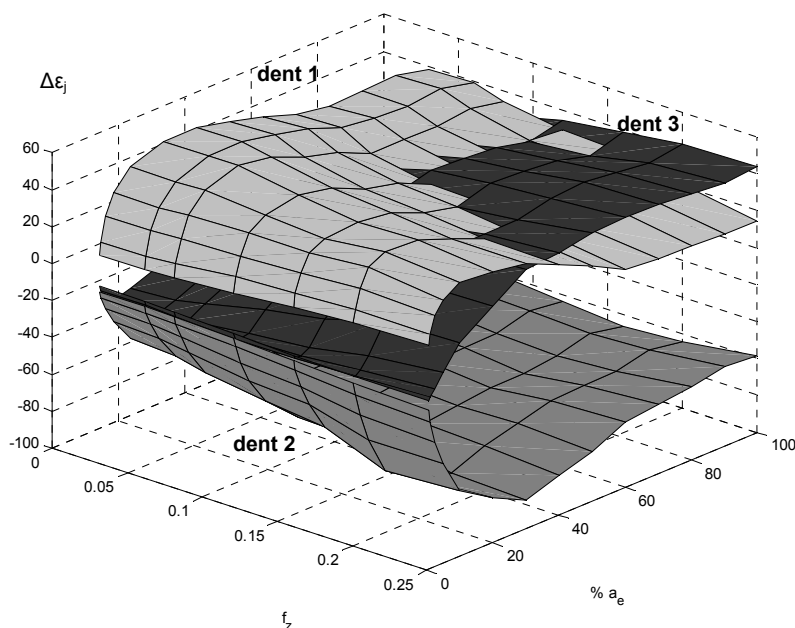


Figure 73. Estimations du battement radial relatif des dents, sur l'ensemble du domaine testé.
(fraise monobloc Ø20 mm à 3 dents, essais B)

Sur le domaine complet, l'étendue des estimations moyennes de $\Delta\epsilon_2$ atteint néanmoins 77 μm . Les variations sont ici essentiellement dues aux cas de faible engagement radial. Les variations dues à l'avance sont du même ordre de grandeurs que pour l'outil précédent. Remarquons que ces variations sont progressives et continues, ceci suggère qu'elles ne sont pas dues à un bruit aléatoire mais à un phénomène physique. Au prochain chapitre, nous tenterons donc d'expliquer ces variations afin de pouvoir les compenser ensuite.

Sur l'outil à 4 dents, le battement radial est assez modéré : les estimations moyennes de chaque dent sont respectivement de +20, -16, -14 et +11 μm . La surveillance pourrait être effectuée ici sur un domaine plus restreint : pour un engagement radial compris entre 20 et 70 % du diamètre

de l'outil. En effet, on s'aperçoit sur la Figure 74 que, sur ce domaine, les variations des estimations sont modérées.

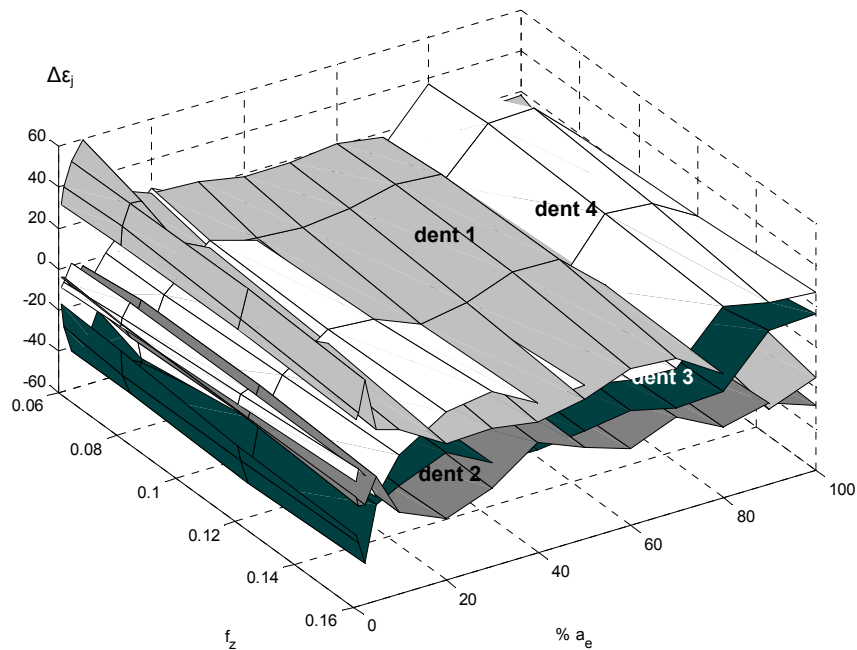


Figure 74. Estimations du battement radial relatif des dents sur l'ensemble du domaine testé.
(fraise Ø 25 mm à 4 plaquettes, essais B)

Sur l'ensemble du domaine de conditions de coupe testé, l'étendue des estimations moyennes de $\Delta\epsilon_I$ atteint tout de même 83 μm pour la dent 1. Ici également, les variations sont essentiellement dues à l'engagement radial et celles dues à l'avance sont du même ordre de grandeurs que pour l'outil à 2 dents. Des solutions devront donc être apportées pour permettre de surveiller les usinages avec des outils où le nombre de dents est important, sur un domaine de conditions de coupe aussi complet que possible.

Notons que sur les passes de rainurage réalisées avec de faibles avances, du broutement a été constaté. Dans un tel cas, la surveillance n'est plus fiable ni précise : elle doit alors être suspendue.

Comme pour les autres outils, la méthode ne permet pas, en l'état, une surveillance précise et fiable lorsque l'engagement radial est faible. Pour les engagements radiaux importants, le problème vient ici du fait que plusieurs dents vont être engagées simultanément dans la matière et la signature de l'outil va être modifiée. Il n'y aura plus un pic d'effort, bien distinct, généré au passage de chaque dent, mais une forme vague, Figure 75.

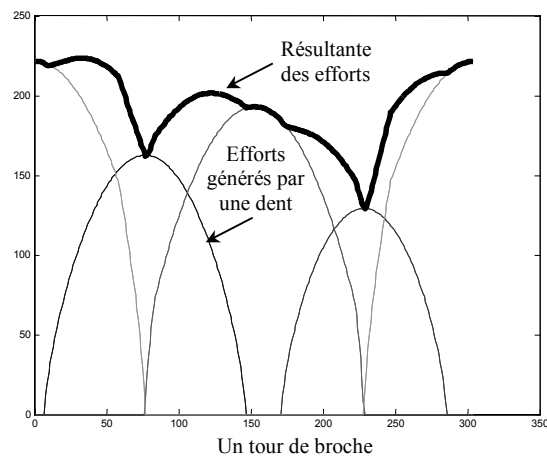


Figure 75. Modification de la signature de l'outil sur la résultante des efforts de coupe, lorsque plusieurs dents sont engagées simultanément (4 dents, a_e 100%, f_z 0,2 mm/dent).

Cela pose tout d'abord un problème technique pour extraire les pics d'efforts, à l'aide de la méthode de recherche de proche en proche présentée précédemment. Dans ce cas, il serait particulièrement utile de connaître à chaque instant la position angulaire de l'outil, pour savoir quelle dent est en train d'usiner, pour éviter toute erreur.

Cela pose surtout la question du domaine de validité du critère tel qu'il est défini actuellement. Reprenons la modélisation des efforts de coupe retenue (équation 24). Cette équation n'est valide que sous l'hypothèse que pas plus d'une seule dent n'est engagée simultanément dans la matière. Plus l'outil comporte un nombre de dents élevé, plus le domaine de conditions de coupe où cette hypothèse est validée se restreint et, par conséquent, il est moins souvent possible de surveiller.

En outre, le critère estime le battement radial des dents en comparant les pics d'efforts générés par chaque dent. Cela suppose donc que toutes les dents usinent à un moment donné du tour de broche. Or, ce n'est pas toujours le cas, comme lorsque l'épaisseur nominale de copeau est faible (engagement radial faible), en présence de battement radial.

Théoriquement, le critère n'est donc valide que pour les conditions de coupe où toutes les dents usinent lors d'un tour de broche (ceci excluant certaines passes de finition) et où pas plus d'une dent n'est engagée simultanément dans la matière (ceci excluant les engagements importants d'outil ayant un nombre de dents élevé). Cela restreint le domaine de conditions de coupe où une Surveillance d'Usinage fiable peut être effectuée. C'est ce que nous venons d'observer : si pour un outil possédant 2 ou 3 dents, un large domaine peut être surveillé (hors finition) ; à partir de 4 dents le domaine se restreint pour les engagements importants. Il sera donc intéressant de proposer au prochain chapitre une alternative pour les cas échéants, c'est-à-dire une formulation plus générale du critère.

6. Conclusions et perspectives

Ayant identifié le manque de fiabilité des méthodes de Surveillance d'Usinage proposées dans la littérature et qui cherchent à identifier précisément l'instant où un incident a lieu, nous proposons l'inverse : c'est-à-dire de ne pas surveiller lorsque les efforts varient brusquement et de diagnostiquer lorsque la coupe est à nouveau stable si l'outil a été endommagé ou non : C'est la Surveillance d'Usinage Intermittente. Cette méthode présuppose l'utilisation d'un critère permettant d'estimer l'état de l'outil, à chaque instant, indépendamment des conditions de coupe.

Afin de développer un critère adéquat pour notre méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente, à partir des efforts de coupe, un couplage entre expérimentations et modélisations a été privilégié. Tout d'abord, la signature du battement radial des dents sur la résultante des efforts de coupe a été constatée expérimentalement. Suite à l'endommagement d'une dent, cette signature a été modifiée. Nous avons montré qu'en fraisage, des mesures moyennées sur un tour de broche ne sont pas suffisamment discriminantes pour détecter des bris de plaquette avec fiabilité et qu'il faut extraire des signaux au moins une entité caractéristique à chaque passage de dent.

D'où l'idée de caractériser l'état de l'outil au travers d'une estimation du battement radial de ses dents. Un tel critère a ensuite été développé à partir de mesures d'efforts et d'un modèle d'efforts. Nous avons ensuite montré que, sur une large gamme de conditions de coupe couramment utilisées lors d'opérations d'ébauche, les estimations varient peu et que cela permet d'effectuer une surveillance d'usinage fiable à 100 % sur ce domaine (pour des outils possédant 2 ou 3 dents). Cette première phase du développement de notre méthode de SUI a ainsi été validée.

Nous avons alors cherché à identifier les principales limites de la méthode de SUI, à la fin de cette première phase de développement, afin de tenter de les combler lors d'une seconde phase de développement (présentée au chapitre suivant). Leur résolution permettrait d'effectuer une surveillance plus précise et plus robuste ; sur une gamme de conditions de coupe plus complète et pour des outils possédant plus de 3 dents.

Afin de diminuer les variations intra-échantillons, le conditionnement des signaux doit être optimisé pour que le système soit plus robuste. Une entité caractéristique plus pertinente que les pics d'efforts, doit être trouvée. En outre, l'extraction de cette entité doit également être améliorée pour être plus fiable.

Ensuite, afin de diminuer les variations inter-échantillons, les variations lentes et régulières des estimations (principalement lorsque l'engagement radial est faible) doivent être expliquées ; dans l'optique d'une correction éventuelle afin d'améliorer la précision du système tout en élargissant le domaine de validité. Enfin, dans ce même but, une formulation plus générale du critère doit être définie (notamment pour les outils possédant plus de 3 dents).

Chapitre IV : Perfectionnement de la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le principe de la Surveillance d'Usinage Intermittente puis proposé un critère adéquat, afin d'estimer l'état de l'outil à chaque instant. Ce dernier donne des résultats très encourageants pour la détection d'endommagements partiels de l'outil, avec une grande fiabilité et sur un large domaine de conditions de coupe en ébauche (pour des outils possédant 2 ou 3 dents). Le calcul du critère est simple et rapide, il est donc particulièrement adapté pour une application en temps réel. Néanmoins des variations régulières des estimations de l'état de l'outil ont été observées, selon les conditions de coupe utilisées (en haut de la Figure 76). Or, tant qu'aucun incident n'a eu lieu, l'état de l'outil reste identique. Ces variations nuisent donc à la précision et à la performance du système de SUI. Si, en simulant des efforts et en leur appliquant notre méthode, nous obtenons les mêmes variations, nous serons alors en mesure de prédire ces erreurs d'estimations¹ et de les compenser (Figure 76).

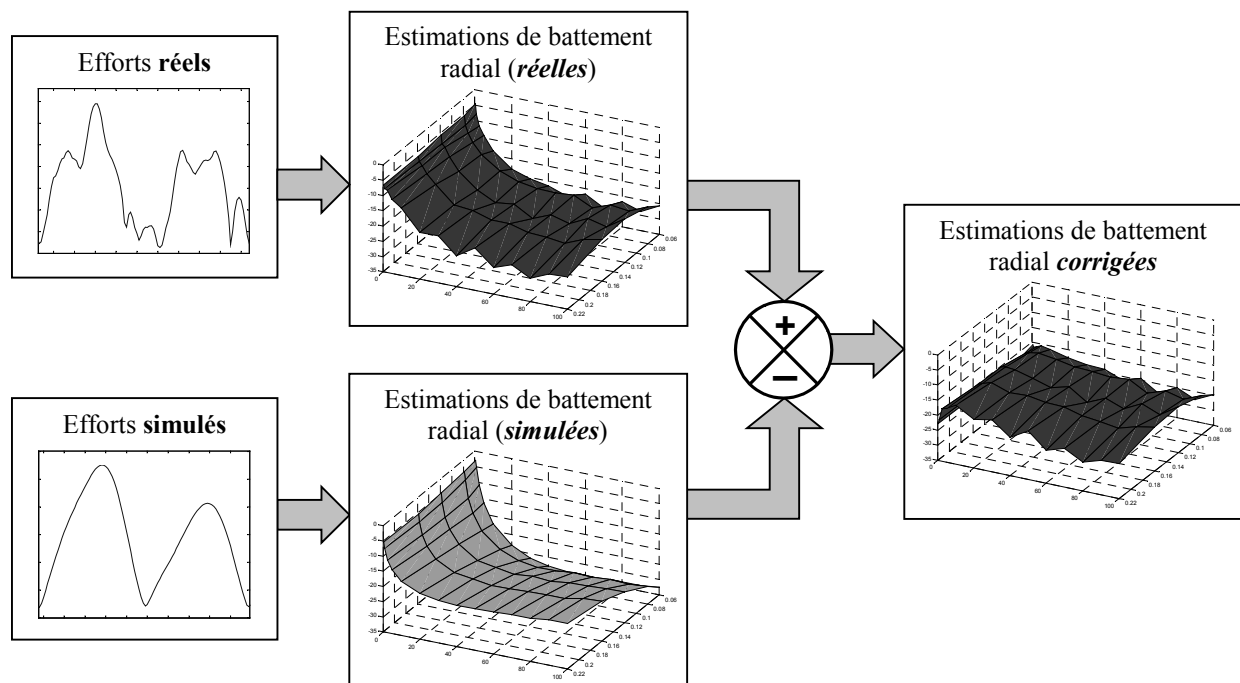


Figure 76. Compensation des variations des estimations, grâce à des simulations numériques.

¹ Un modèle d'efforts plus précis est utilisé pour simuler les efforts. Nous verrons au 4.1 qu'il n'est pas possible d'inverser ce modèle pour estimer directement le battement radial des dents ; d'où la correction proposée Figure 76.

Nous pourrions ainsi effectuer une surveillance d'usinage plus fine et plus précise. Ce sera l'un des principaux objectifs de ce chapitre.

Pour pouvoir effectuer cette correction des estimations, une phase de préparation de la Surveillance d'Usinage Intermittente est nécessaire, avant l'usinage de la pièce (Figure 77). Les étapes de cette phase de préparation sont notées *A...* sur les diagrammes de la Figure 78. Elle comprend l'usinage de 4 passes d'étalonnage, l'analyse du programme ISO de la pièce (*A5*) et les simulations numériques des efforts de coupe (*A1-A2*). Les estimations de l'état de l'outil sont alors calculées, pour chaque jeu de conditions de coupe allant être rencontré au cours de l'usinage de la pièce (*A3-A4*).

L'usinage de la pièce peut ensuite commencer et être surveillé (Figure 79). Une estimation de l'état de l'outil est établie en permanence par notre critère de SUI (*B1-B3-B4*). Elle est ensuite corrigée en fonction des conditions de coupe et des simulations effectuées au préalable (*B5*). Elle est alors reportée sur une carte de contrôle qui, lorsque la coupe est stable, permet d'établir un diagnostic quant à l'état de l'outil (*B6*).

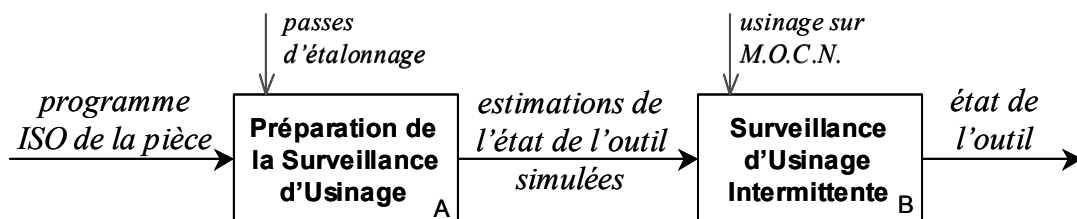


Figure 77. Schémas de principe de la méthode de SUI.

Au chapitre III, les principales limites de la méthode, à l'issu de la première phase de son développement, ont été identifiées. La méthode doit maintenant être améliorée pour accroître la robustesse et la précision des détections d'endommagements de l'outil ; ainsi qu'étendre la surveillance à un domaine plus complet de conditions de coupe. En outre, à la fin de cette seconde phase de développement de notre méthode, cette dernière devra être capable de surveiller les usinages réalisés avec des outils possédant plus de 3 dents.

Au chapitre IV, des solutions sont donc proposées pour tous les blocs des diagrammes de la page de droite (hormis pour le calcul des conditions de coupe, *A5*, car il a déjà été présenté au chapitre II). Un simulateur d'efforts de coupe va notamment être développé. Afin de juger de la pertinence des solutions proposées pour les différents éléments du système de Surveillance d'Usinage Intermittente, des indicateurs de qualité vont être définis et une étude de robustesse va être menée (à partir de nouvelles expérimentations). Nous déterminerons ainsi la configuration optimale des paramètres clés des éléments du système de SUI.

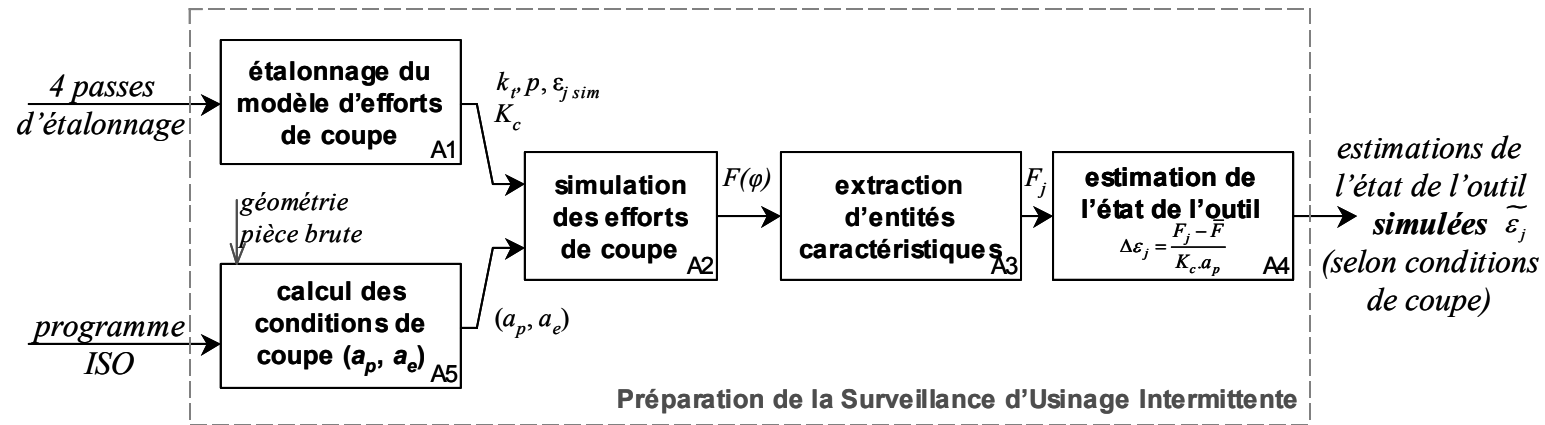


Figure 78. Diagramme représentant les étapes de la phase de préparation de la SUI (avant l'usinage).

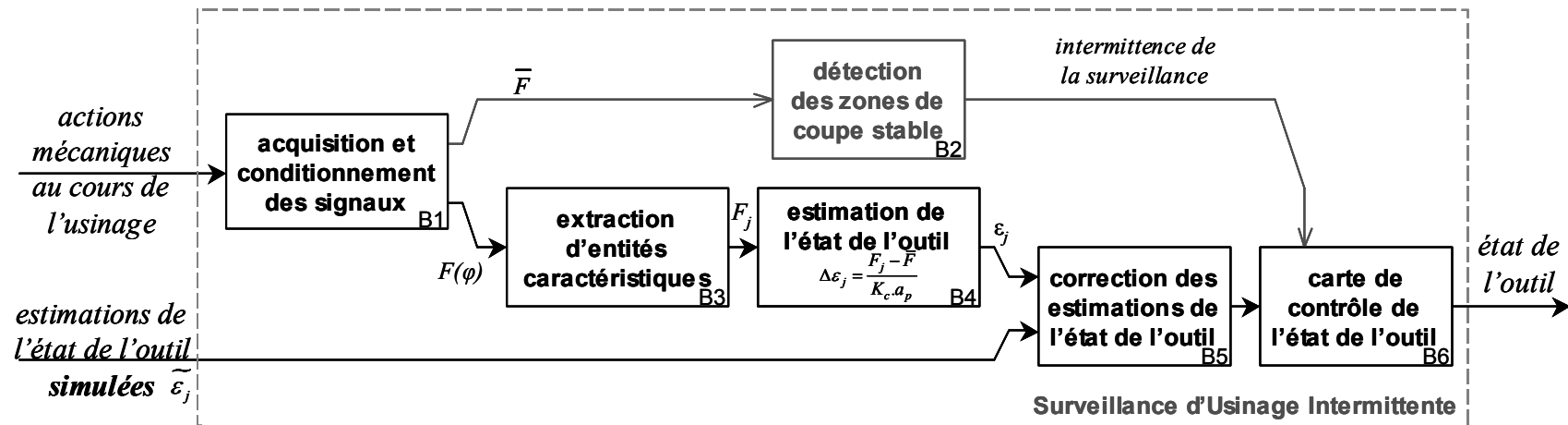


Figure 79. Diagramme représentant les différents éléments de la méthode de SUI (pendant l'usinage).

1. Expérimentations

Une 3^e série d'essais « C » a été réalisée, sur un centre UGV Hermle C800 U, piloté par une Heidenhain TNC430. Ces essais sont utilisés pour effectuer cette seconde phase du développement de la méthode de SUI, qui est présentée dans ce chapitre et dont le but est d'améliorer la précision et la robustesse de la méthode de SUI. Ainsi de nombreux essais sont nécessaires pour permettre de mener une étude de robustesse. Il s'agit des passes réalisées avec les outils possédant 2 et 3 dents (Tableau 8 et Tableau 9).

Paramètre	Valeur
5 avances à la dent	0.06, 0.08, 0.12, 0.16, 0.22 mm/dent
14 engagements radiaux (% diamètre outil)	0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 % (opposition)
Outil à 2 dents	Fraise cylindrique de diamètre 20 mm avec 2 plaquettes (Mitsubishi VP15TF)
Vitesse de coupe	933 m/min
Engagement axial	2 mm
Matière	Alliage d'aluminium 2024

Tableau 8. Données du plan complet des expérimentations C avec l'outil à 2 dents (réalisé une fois avec un battement radial faible entre les dents et une fois avec un battement important).

Paramètre	Valeur
5 avances à la dent	0.05, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2 mm/dent
15 engagements radiaux (% diamètre outil)	2, 6, 12, 28, 48, 64, 84, 100 % (en avalant & en opposition)
Outil à 3 dents	Fraise cylindrique Ø25 mm avec 3 plaquettes (SECO non-revêtue H15)
Vitesse de coupe	600 m/min
Engagement axial	2 mm
Matière	Alliage d'aluminium 2017

Tableau 9. Données du plan complet des expérimentations C avec l'outil à 3 dents.

Tout comme lors des séries d'essais A et B, nous avons fait varier l'avance et l'engagement radial sur un nombre important de niveaux, afin de juger de la robustesse de la méthode sur un domaine de conditions de coupe le plus complet possible. Nous avons également utilisé plusieurs

outils. Plus précisément, nous avons inclus dans notre étude l'influence de l'ordre de grandeur du battement radial des dents sur la robustesse de notre méthode (nous verrons dans ce chapitre que cela s'est avéré discriminant). Ainsi, le plan complet de 70 passes concernant l'outil à 2 dents (Tableau 8), a été réalisé tout d'abord pour un battement radial faible (4 μm) et ensuite pour un battement important (22 μm). Le Tableau 9 concerne l'outil à 3 dents, aux battements (faible et important) de +9 et -51 μm . L'étude de robustesse porte ainsi sur 215 passes.

Paramètre	Valeur
2 avances à la dent	0.12, 0.22 mm/dent
10 engagements radiaux (% diamètre outil)	1, 3, 7, 14, 26, 40, 54, 69, 85, 100 % (opposition)
Outil à 5 dents	Fraise cylindrique de diamètre 40 mm avec 5 plaquettes (Sandvik)
Vitesse de coupe	620 m/min
Engagement axial	2 mm
Matière	Alliage d'aluminium 2024

Tableau 10. Données du plan complet des expérimentations D avec l'outil à 5 dents.

Ensuite, une série d'expérimentations D a été réalisée avec un outil à 5 dents, afin de valider les améliorations apportées à la méthode de SUI dans ce chapitre. Pour cela, les essais du Tableau 10 ont été réalisés tout d'abord avec 5 plaquettes neuves. Puis, une des dents a été endommagée par nos soins et les mêmes essais ont été réalisés à nouveau.

La qualité de l'asservissement de la broche du Hermle est meilleure que sur le Cincinnati. Notons que les critères étudiés au chapitre II, tout comme celui que nous avons proposé au chapitre III, caractérisent l'état de l'outil à partir du travail réalisé par chaque dent. Il est donc important de connaître précisément quand chaque dent enlève de la matière. L'idéal est de disposer d'un codeur de broche pour synchroniser les acquisitions d'efforts [Alt89] ; mais n'en disposant pas au moment des essais, la qualité de l'asservissement est donc importante pour estimer la position angulaire de l'outil à chaque instant. Sur le Cincinnati par exemple, la broche est uniquement asservie en vitesse et elle peut prendre au moins un tour de retard lors de la phase d'entrée en matière, si la charge est importante. Alors que ce problème de retard disparaît avec l'asservissement en vitesse et en position de la broche du Hermle, ce qui permet une plus grande fiabilité des analyses. C'est pourquoi une machine différente a été utilisée pour les séries d'essais C et D.

2. Définition d'indicateurs de qualité

2.1. Pour les estimations de battement radial

Afin de pouvoir détecter de faibles endommagements des parties coupantes de l'outil, les estimations de l'état de l'outil doivent varier le moins possible ; et ce quelles que soient les conditions de coupe rencontrées lors de l'usinage d'une pièce. Nous allons donc caractériser les dispersions de l'estimation de l'état outil par différents indicateurs, afin de pouvoir déterminer si l'effet d'un réglage donné d'un paramètre de notre système de Surveillance d'Usinage Intermittent est positif ou non.

L'indicateur le plus simple est l'étendue des variations. Il est représentatif du pire des cas et permet d'avoir rapidement l'ordre de grandeur d'une dispersion. Néanmoins, il est très sensible aux valeurs aberrantes, ce qui peut mener à des conclusions erronées.

L'écart-type est moins sensible aux valeurs aberrantes. Il est donc généralement préféré à l'étendue. Lorsque la variable étudiée est gaussienne, l'écart-type permet de déterminer la répartition de la population autour de la valeur moyenne. La statistique étudiée ici est l'estimation du battement radial des dents. Il a été vérifié que sa distribution suit une loi Normale. En anticipant sur les corrections d'estimations que nous proposerons dans ce chapitre, la Figure 80 présente le résultat obtenu pour l'outil à 2 dents (avec un battement radial important) lors des expérimentations C, Tableau 8.

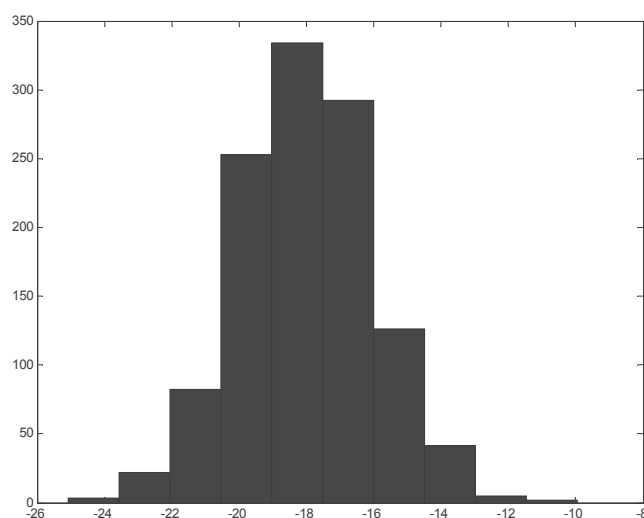


Figure 80. Histogramme de distribution des estimations de battement radial (après correction).

Dans cette partie, nous utiliserons les mesures réalisées lors de la série d'essais C, au cours de laquelle un nombre N (70 environ) de passes rectilignes ont été usinées. Sur chaque passe i , une zone de coupe stable peut être identifiée, sur laquelle des données caractéristiques de chaque

dent j sont extraites à chaque tour de broche k , afin de calculer les estimations de battement radial $\varepsilon_{i j k}$. Un même nombre de tours de broche n (60 environ) est traité pour chaque passe afin de former des échantillons de taille égale. Notre méthode considère les dents individuellement, donc chaque indicateur de qualité est systématiquement calculé pour chaque dent. Afin d'alléger les notations dans ce paragraphe, l'indice de la dent j ne sera pas inscrit. Un échantillon est donc extrait pour chaque jeu de conditions de coupe i . La taille des échantillons n est supérieure à 30 ; donc, pour chaque échantillon, l'estimateur d'écart-type suivant peut être utilisé :

$$s_{\varepsilon i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\varepsilon_{ik} - \bar{\varepsilon}_i)^2}{n-1}} \quad 28$$

où $\bar{\varepsilon}_i$ est la moyenne des ε_{ik} sur cet échantillon.

Cela permet de calculer l'écart-type intra-échantillon $\sigma_{\varepsilon intra}$. Il va principalement représenter la variabilité des estimations de battement radial due à la coupe. Contrairement à la moyenne des écart-types, la moyenne des variances n'est pas biaisée [Pil93], d'où

$$\sigma_{\varepsilon intra} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s_{\varepsilon i}^2}{N}} \quad 29$$

L'écart-type inter-échantillon $\sigma_{\varepsilon inter}$ sera particulièrement sensible aux variations régulières observées précédemment (haut de la Figure 76). Si $\bar{\varepsilon}$ est la moyenne des estimations de battement radial calculée sur l'ensemble de la population, $\sigma_{\varepsilon inter}$ est estimée par,

$$\sigma_{\varepsilon inter} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon})^2}{N-1}} \quad 30$$

L'écart-type de l'ensemble de la population des estimations $\sigma_{\varepsilon}^{pop}$ est donné par,

$$\sigma_{\varepsilon}^{pop} = \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_{ik} - \bar{\varepsilon})^2}{nN-1}} \quad 31$$

Afin de minimiser la sensibilité au bruit de notre système et donc augmenter sa robustesse, nous allons utiliser le rapport Signal/Bruit. L'objectif étant ici un nominal, le rapport sera donc défini par :

$$S / N_{\varepsilon} = 20 \log \frac{\bar{\varepsilon}}{\sigma_{\varepsilon}^{pop}} \quad 32$$

La configuration la plus robuste du système de Surveillance d'Usinage Intermittente sera obtenue lorsque S/N_ε est maximum.

2.2. Pour les efforts

De la même manière que pour les estimations de battement radial, les dispersions des efforts mesurés expérimentalement vont être caractérisées par $\sigma_{F intra}$, calculé à partir de l'entité caractéristique (par exemple le pic d'effort) extraite des efforts au passage de chaque dent.

$$s_{Fi} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (F_{ik} - \bar{F}_i)^2}{n-1}} \quad 33$$

$$\sigma_{F intra} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s_{Fi}^2}{N}} \quad 34$$

Nous allons développer un simulateur d'efforts de coupe. Pour juger de la qualité des simulations, nous allons également définir des indicateurs de qualité. Une variance inter-échantillon, telle que définit pour les estimations de battement, n'a pas de sens car les niveaux d'efforts varient lorsque les conditions de coupe changent. Par contre, afin de juger de la qualité des simulations, il va être intéressant de calculer les écarts entre les valeurs moyennes de l'entité extraite des efforts simulés \hat{F}_i et des mesures expérimentales F_i , en fonction des conditions de coupe i , pour chaque dent j . L'étendue puis l'écart-type $\sigma_{F inter}$ sont évalués. Si $\overline{\Delta F}$ est l'écart moyen,

$$\sigma_{F inter} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{F}_i - F_i - \overline{\Delta F})^2}{N-1}} \quad 35$$

Afin d'évaluer la robustesse du simulateur (en comparant les résultats des étapes A3 et B3 des diagrammes, page 125), un rapport Signal/Bruit relatif aux efforts a également été défini. L'objectif est ici de minimiser les écarts entre simulations et expérimentations, la formulation est donc :

$$S / N_F = -10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{F}_i - F_i)^2 \right) \quad 36$$

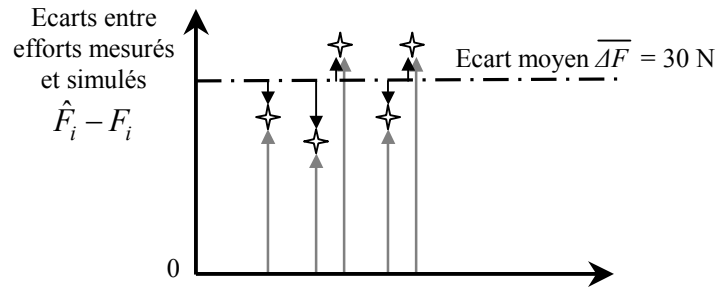


Figure 81. Nuance entre l'écart-type et le rapport S/N , lorsque que l'objectif est à minimiser.

Le rapport signal sur bruit S/N_F est plus pertinent que $\sigma_{F_{inter}}$. En effet, nous souhaitons avoir des efforts simulés aussi proches que possible de la réalité, quelles que soient les conditions de coupe i . Prenons l'exemple d'un écart entre simulations et expérimentations valant $30^{+/-5}$ N. $\sigma_{F_{inter}}$ (calculé à partir des flèches noires de la Figure 81) pourra être acceptable, malgré l'erreur systématique de 30 N. Seul S/N_F traduira véritablement des erreurs de simulation importantes (flèches grises).

3. Simulation des efforts de coupe

Sur la Figure 76, nous avons vu que nous envisageons de compenser les variations des estimations de battement radial ; lorsque l'engagement radial varie notamment. Nous avons donc besoin d'un simulateur d'efforts de coupe pour étudier si ces variations peuvent s'expliquer par un modèle d'efforts de coupe mieux adapté. Dans ce cas, il sera possible de prédire les erreurs d'estimation et de les compenser (Figure 76 à Figure 77). En outre, ce simulateur va nous permettre d'améliorer la performance et la robustesse de notre système de Surveillance d'Usinage Intermittente.

3.1. Modèle mécanique d'efforts de coupe

Dans ce paragraphe, nous allons présenter le contenu du bloc A2 des diagrammes. Afin d'effectuer des simulations, un modèle d'efforts de coupe est tout d'abord nécessaire. De nombreux modèles ont été développés. Smith et Tlustý [Smi91] présentent un large éventail en fonction des hypothèses retenues. Nous avons vu précédemment que pour détecter le bris d'une dent, il est impératif de considérer les efforts générés au passage de chaque dent. Un modèle basé sur les efforts moyens n'est donc pas suffisant. Notre critère de SUI est issu d'un modèle où les efforts de coupe sont une fonction affine de l'épaisseur de copeau. Les résultats sont encourageants mais pas suffisants. Des modèles très précis existent [Oxl89] [Che04] , basés sur des lois de comportement thermo-visco-plastique et des modèles géométriques et cinématiques de la coupe, ils donnent des résultats de simulations robustes mais nécessitent des temps de calcul très conséquents. Nous avons donc retenu ici un modèle d'efforts simplifié, de type

tangentiell-radial. Nos expérimentations couvrent une large gamme de conditions de coupe, avec notamment de faibles épaisseurs nominales de copeau, la non-linéarité des efforts de coupe a donc été prise en compte. Ce qui nous a conduit au modèle de Kline, DeVor et Lindberg [Kli82],

$$F_t(\varphi) = k_t \cdot a_p \cdot h_c(\varphi)^{1+p} \quad 37$$

$$F_r(\varphi) = k_r \cdot F_t(\varphi) \quad 38$$

où a_p est l'engagement axial, $h_c(\varphi)$ l'épaisseur de copeau instantanée, φ la position angulaire de l'outil ; k_t , k_r et p sont des constantes relatives au couple outil/matière. Si l'outil possède plusieurs dents j , un battement radial simple ε_j sera constaté [Jay01] et l'épaisseur de copeau enlevée par chaque dent j sera alors :

$$h_{c_j}(\varphi) = f_z \sin \varphi + \varepsilon_j - \varepsilon_{j-1} = f_z \sin \varphi + \Delta \varepsilon_j \quad 39$$

Pour être exact, il faut prendre en compte le cas où une des dents n'usine pas (sur un tour de broche complet) parce que son battement radial relatif est trop faible devant l'épaisseur nominale de copeau (le membre de droite de l'équation 39 est alors négatif). Dans ce cas, la dent suivante ($k=1$) doit enlever une épaisseur supplémentaire, si son battement le permet, et ainsi de suite pour les Z dents de l'outil. D'où la formulation plus exacte :

$$h_{c_j}(\varphi) = \min \{ \varepsilon_j + k \cdot f_z \sin \varphi - \varepsilon_{j-k}, k \in \llbracket 1, Z \rrbracket \} \quad 40$$

$$h_{c_j}(\varphi) \geq 0 \quad 41$$

La condition 41 doit être rajoutée car une épaisseur de copeau ne peut être que positive. En outre, il est entendu que l'épaisseur de copeau est nulle si la position angulaire de la dent n'est pas située entre les angles d'entrée φ_e et de sortie matière φ_s , Figure 82.

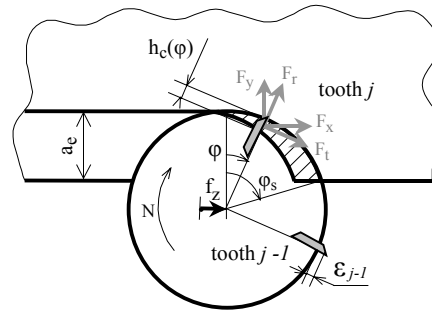


Figure 82. Schématisation des efforts de coupe.

Tout comme pour les mesures expérimentales d'effort (bloc B1 des diagrammes), la procédure de conditionnement de signaux est ensuite appliquée aux signaux simulés (au sein du bloc A2) :

1. filtrage des efforts en X et en Y
2. calcul de la résultante des efforts de coupe (dans le plan XY)

Le modèle d'effort (et le conditionnement des signaux) va ainsi nous permettre de prédire les efforts de coupe pour n'importe quel jeu de conditions de coupe.

3.2. Etalonnage du modèle d'efforts

Après avoir précisé la façon dont les efforts de coupe sont calculés, il reste maintenant à spécifier les constantes du modèle d'efforts (bloc *A1* des diagrammes). Nous avons donc défini un protocole pour l'étalonnage. Les paragraphes qui suivent sont une synthèse et davantage de précisions sont apportées en annexes.

En vue d'appliquer notre méthode en milieux industriels, le nombre de passes doit être faible pour que la phase de préparation de la SUI soit rapide. 4 passes d'étalonnage sont réalisées avec le même outil et dans la même matière que la pièce (soit sur une éprouvette disposée sur la table de la fraiseuse à côté de la pièce à surveiller, soit directement dans une partie de la pièce devant être usinée par la suite. En effet, 2 niveaux d'avance différents sont nécessaires pour identifier le coefficient p du modèle d'effort. Ensuite, 2 niveaux d'engagement radial sont nécessaires pour pouvoir identifier correctement de faibles battements radiaux.

Concernant la série des essais *C*, les passes d'étalonnage sont donc celles répertoriées dans le Tableau 11.

Passes d'étalonnage	Avance (mm/dent)	Engagement radial (% diamètre)
1	0,12	80 %
2	0,22	80 %
3	0,12	30 %
4	0,22	30 %

Tableau 11. Conditions de coupe des passes d'étalonnage.

L'obtention des entités caractéristiques F_j (pics d'effort ou autre) fait suite à la procédure de conditionnement des signaux (filtrage, ...). Comme on ne peut pas inverser l'effet du filtrage (entre autres) et calculer directement les constantes du couple outil/matière, des itérations sont nécessaires afin de déterminer les valeurs des constantes qui permettent d'obtenir le résultat simulé le plus proche des entités réelles (extraites des passes d'étalonnage). L'algorithme d'étalonnage est présenté en annexe. Il comprend 4 boucles d'optimisation successives.

Cette intégration numérique n'est pas gênante pour notre système de Surveillance d'Usinage Intermittente car l'opération d'étalonnage est effectuée hors-ligne, avant l'usinage de la pièce qui doit être surveillé.

Notons que le coefficient k_r du modèle d'efforts est actuellement fixé à 0,5. En effet, suivant la littérature, les valeurs sont généralement comprises entre 0,3 [Tlu00] et 0,6 [Jap78] [Gar00]. Ultérieurement, il sera envisageable d'identifier cette constante si cela s'avère nécessaire.

Lors des boucles d'optimisation, les efforts sont simulés en fonction des valeurs des constantes $\varepsilon_{j\text{ sim}}$, k_t et p , pour les 4 jeux de conditions de coupe des passes d'étalonnage ; puis la procédure de conditionnement des signaux est appliquée et les entités caractéristiques F_j sont extraites. Comme nous cherchons à minimiser les écarts entre simulations et expérimentations, la fonction coût des boucles d'optimisation est définie par :

$$W_a = \sum_{i,j} (F_{ji} - \hat{F}_{ji})^2 \quad 42$$

où F_{ji} correspond à l'entité caractéristique extraite des signaux expérimentaux au passage de la dent j , lors de la passe d'étalonnage i et où \hat{F}_{ji} est issu des simulations numériques.

3.3. Validation de l'approche

Les principes de fonctionnement du simulateur d'efforts et de la phase d'étalonnage ont ainsi été définis. L'approche que nous avons proposée consiste à corriger les estimations de l'état de l'outil, réalisées pendant l'usinage, grâce à des simulations numériques effectuées au préalable (Figure 76). Afin valider cette approche, nous avons comparé les résultats obtenus à la fois à partir des expérimentations et des simulations (blocs A4 et B4 des diagrammes). Des niveaux similaires d'estimations de battement radial ont été obtenus ; quelles que soient les conditions de coupe (cf. Figure 83 et annexe).

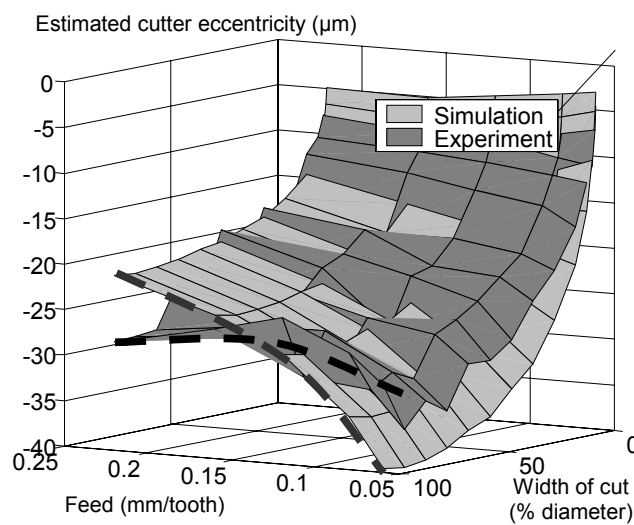


Figure 83. Comparaison du battement radial estimé à partir de signaux d'efforts expérimentaux et simulés. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c])

Notre critère de SUI est basé sur un modèle d'effort affine. Cependant, nous avons vu à la fin du chapitre précédent que les estimations de battement radial qu'il permet d'effectuer, ne restent pas identiques lorsque les conditions de coupe varient. Le simulateur d'efforts que nous venons de développer à partir d'un modèle d'efforts non-linéaire, permet par contre de simuler correctement les efforts, en prenant en compte l'effet réel du battement radial des dents. Il est ainsi plus précis. Il va surtout nous permettre de prédire l'erreur sur l'estimation du battement radial faite par notre critère, selon les conditions de coupe rencontrées à chaque instant de l'usinage d'une pièce (Figure 83). Nous allons donc pouvoir compenser cette erreur (pendant l'usinage, grâce aux simulations numériques effectuées au préalable). C'est là un résultat important pour notre méthode de SUI.

3.4. Fonctions coûts de l'optimisation

Nous venons d'évoquer que l'approche a été validée. Néanmoins, nous pouvons constater (au premier plan de la Figure 83) que des écarts modérés entre expérimentations et simulations sur les estimations du battement radial, sont obtenus lorsque l'avance varie (comparativement, les écarts dus aux variations de l'engagement radial sont plus faibles). Or, notre objectif est d'estimer l'état de l'outil avec robustesse, et non de prédire au Newton près l'amplitude d'un pic d'effort. Par conséquent, la fonction coût des boucles d'optimisation de la phase d'étalonnage W_a (proposée à l'équation 42) n'est pas nécessairement la plus pertinente, dans notre cas. Les estimations de battement radial sont obtenues à partir des écarts entre les valeurs des entités F_j extraites pour les différentes dents de l'outil. Il serait donc intéressant que cela soit pris en compte dans la fonction coût, afin de réduire les écarts que nous venons de constater. D'où

$$W_b = \sum_{i,j} (\Delta F_j - \Delta \hat{F}_j)^2 \text{ où } \Delta F_j = F_j - F_{j-1} \quad 43$$

Nous chercherons donc un compromis entre les fonctions coût W_a et W_b . D'où la proposition de la fonction coût suivante :

$$W_\lambda = \sum_{i,j} (F_{ji} - \hat{F}_{ji})^2 + \lambda \cdot \sum_{i,j} (\Delta F_{ji} - \Delta \hat{F}_{ji})^2 = W_a + \lambda \cdot W_b \quad 44$$

La variable d'ajustement λ permet d'effectuer ce compromis entre les 2 fonctions coût. Il sera réglé dans la dernière partie de ce chapitre. D'ici là, λ est fixé à 0.

Nous venons ainsi de développer notre simulateur d'efforts de coupe et de vérifier qu'il donne des résultats satisfaisants, permettant de valider l'approche. Il nous sera un outil essentiel afin de perfectionner notre méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente.

4. Nouvelle formulation du critère de Surveillance d'Usinage Intermittente

Comme chaque élément de la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente, la définition du critère permettant d'estimer l'état de l'outil peut également être approfondie (blocs A4 et B4 des diagrammes).

4.1. Formulation du critère

Nous avons vu que le modèle d'effort de coupe utilisé dans le simulateur est particulièrement pertinent pour décrire l'effet réel du battement radial des dents sur les efforts. Nous allons donc discuter de la modélisation à partir de laquelle le critère permettant d'estimer le battement radial des dents, doit être défini.

Le simulateur que nous venons de développer repose sur une modélisation non-linéaire des efforts de coupe (équations 37 et 38). Elle permet d'obtenir une bonne corrélation entre les niveaux d'efforts issus d'expérimentations et de simulations, quelles que soient les conditions de coupe données (zones 1 et 2 de la Figure 84).

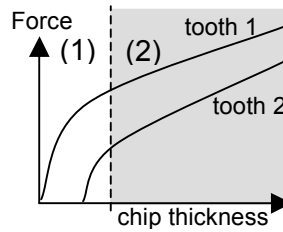


Figure 84. Non-linéarité des efforts de coupe [Rit06c].

Il est donc tentant d'inverser ce modèle non-linéaire pour définir un nouveau critère. Comme ce critère est voué à une application en temps réel, sa formulation doit être explicite ($\Delta \varepsilon_j = \dots$). En effet, un nombre aléatoire d'itérations pour déterminer la solution d'une formulation implicite n'est pas envisageable pour une application en temps réel.

Une telle formulation explicite pourrait être obtenue en linéarisant le modèle non-linéaire :

$$F^{1/(1+p)} = k_c \cdot a_p \cdot (f_z \sin \varphi + \Delta \varepsilon_j) \quad 45$$

Néanmoins, en linéarisant ainsi le problème, la correction des mesures d'efforts par rapport au coefficient p (exemple de l'équation 45) introduit des erreurs importantes à cause de la sensibilité à p et de la chaîne de conditionnement des signaux (filtrage notamment) [Rit06c]. En outre, en prenant classiquement p valant $-0,3$, l'exposant vaut $1,43$. Par conséquent, le pic d'effort généré par une dent qui usine moins, sera alors souvent négligeable devant le pic généré par la dent qui usine le plus (après cette correction par l'équation 45). Dans ce cas, il est difficile d'estimer et de quantifier le battement radial des dents.

Enfin, dans les cas où plusieurs dents d'un outil sont engagées simultanément dans la matière, il n'est pas possible de découpler le travail de chaque dent, à partir de la résultante des efforts (ou même à partir des efforts mesurés en X et Y). Le découplage du travail des dents et la linéarisation par l'équation 45 n'ont alors plus de sens et ne sont pas possibles.

Le domaine de validité du modèle d'effort de coupe affine sur lequel notre critère de SUI est basé, est limité à la zone N°2 de la Figure 84. Néanmoins, il permet un calcul simple et rapide. Il est donc favorable à une application de SU en temps réel. C'est pourquoi ce modèle d'effort plus simple est préférable ici afin d'estimer le battement radial des dents rapidement, quitte à appliquer un terme correctif aux estimations pour les zones situées en dehors de son domaine de validité. Par conséquent, nous allons conserver la formulation du critère de SUI permettant d'estimer le battement radial des dents qui a été proposée au chapitre précédent :

$$\Delta \varepsilon_j(n) = \frac{F_j(n) - \bar{F}_j(n)}{K_c \cdot a_p} \quad 46$$

4.2. Battement radial simple

Le critère que nous avons formulé permet d'estimer le battement radial relatif $\Delta \varepsilon_j$ de chacune des Z dents de l'outil. Or, par définition, la somme des $\Delta \varepsilon_j$ de toutes les dents est nulle. Cette équation relie les Z valeurs de battement radial relatif. Par conséquent, Z-1 valeurs suffisent à les décrire. C'est pourquoi nous pouvons en déduire les valeurs de battement radial simple ε_j de chacune des dents. Pour cela, il suffit de se donner une valeur de référence. Par exemple, fixons le battement radial simple de la dent N°1 (celle qui génère les efforts les plus importants) à zéro, ce qui permet ensuite de déduire le battement radial simple des autres dents, par rapport à la dent N°1.

$$\varepsilon_1 = 0 \quad 47$$

4.3. Limite inférieure du domaine de validité

Par limite inférieure, nous entendons la limite du domaine de validité du critère lorsqu'une dent enlève peu ou pas de matière. En effet, si une dent a un battement plus faible que les autres, elle peut être amenée à ne plus usiner (en cas d'une chute importante de l'avance par exemple). Prenons le cas d'un outil à 4 dents, où ε_3 est très faible. Si pas plus d'une dent n'est engagée simultanément dans la matière et que l'épaisseur nominale de copeau h_c ne permet pas à la dent N°3 d'enlever de la matière, il résulte l'équation 48 du modèle d'effort de coupe linéaire.

$$\begin{cases} F_1 = K_c \cdot a_p \cdot (h_c + \varepsilon_1 - \varepsilon_4) \\ F_2 = K_c \cdot a_p \cdot (h_c + \varepsilon_2 - \varepsilon_1) \\ F_3 = 0 \\ F_4 = K_c \cdot a_p \cdot (2h_c + \varepsilon_4 - \varepsilon_2) \\ \bar{F} = K_c \cdot a_p \cdot h_c \end{cases} \quad 48$$

En appliquant notre critère (équation 46), on obtient analytiquement les estimations suivantes :

$$\begin{cases} \widetilde{\Delta \varepsilon_1} = \varepsilon_1 - \varepsilon_4 \\ \widetilde{\Delta \varepsilon_2} = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \\ \widetilde{\Delta \varepsilon_3} = -h_c \\ \widetilde{\Delta \varepsilon_4} = h_c + \varepsilon_4 - \varepsilon_2 \end{cases} \quad 49$$

Comme la dent 3 ne participe plus à la coupe, il n'est pas possible d'estimer l'état de cette dent. En fixant $\varepsilon_1 = 0$, il est possible de déduire le battement simple des dents 2 et 4 (par rapport à la dent 1) à partir des estimations de $\Delta \varepsilon_1$ et $\Delta \varepsilon_2$ (mais pas à partir de $\Delta \varepsilon_4$).

On peut continuer cet exemple en supposant que le battement de la dent 2 est faible également et que, si l'avance continue de chuter, elle ne participera plus à la coupe. On obtiendra alors analytiquement :

$$\begin{cases} F_1 = K_c \cdot a_p \cdot (h_c + \varepsilon_1 - \varepsilon_4) \\ F_2 = 0 \\ F_3 = 0 \\ F_4 = K_c \cdot a_p \cdot (3h_c + \varepsilon_4 - \varepsilon_1) \\ \bar{F} = K_c \cdot a_p \cdot h_c \end{cases} \quad 50$$

$$\begin{cases} \widetilde{\Delta \varepsilon_1} = \varepsilon_1 - \varepsilon_4 \\ \widetilde{\Delta \varepsilon_2} = -h_c \\ \widetilde{\Delta \varepsilon_3} = -h_c \\ \widetilde{\Delta \varepsilon_4} = 2h_c + \varepsilon_4 - \varepsilon_1 \end{cases} \quad 51$$

Le battement des dents 2 et 3 ne peut être estimé et seul l'estimation de $\Delta \varepsilon_1$ permet d'obtenir une estimation de ε_4 . Ainsi, lorsque certaines des dents ne participent pas à la coupe (du fait d'un battement radial trop faible par rapport à l'épaisseur nominale de copeau), il convient d'être vigilant afin de calculer le battement des dents de manière pertinente (équations 49 et 51).

Lors d'expérimentations, pour déterminer qu'une dent n'usine pas il est plus pertinent de placer un seuil sur les efforts que sur l'épaisseur nominale de copeau h_c . En effet, pour une même valeur théorique d' h_c , les valeurs d'efforts générés par une dent vont varier selon que ce soit surtout l'avance ou l'engagement radial qui soit faible. Le maximum des efforts de coupe lors du passage d'une dent, est donc comparé à un seuil empirique. Si la valeur des efforts est inférieure,

le système considère que la dent n'usine pas et adapte alors la façon d'estimer le battement simple des dents. Pour les séries d'essais présentées antérieurement, le seuil a été placé empiriquement à 7 N.

Dans la suite de notre étude, nous allons déterminer la configuration la plus robuste de notre système de Surveillance d'Usinage Intermittente, en cherchant à minimiser les variations des estimations de battement radial. Il est donc nécessaire de pouvoir estimer le battement de toutes les dents. Par conséquent, les jeux de conditions de coupe pour lesquelles certaines des dents ne participent pas à la coupe, seront écartés de l'étude de robustesse et de la phase de validation qui sont situées à la fin de ce chapitre.

4.4. Limite supérieure du domaine de validité

Les calculs analytiques présentés dans le paragraphe précédent reposent sur l'hypothèse que pas plus d'une dent n'est engagée simultanément dans la matière. En effet, si ce n'est pas le cas, le pic d'effort généré lors du passage d'une dent ne surviendra pas nécessairement lorsque cette même dent enlève une épaisseur de copeau maximale. Surtout, ce pic représente plus que le seul travail de cette dent, car une dent adjacente peut être en train d'enlever une quantité au moins aussi importante de matière (Figure 85).

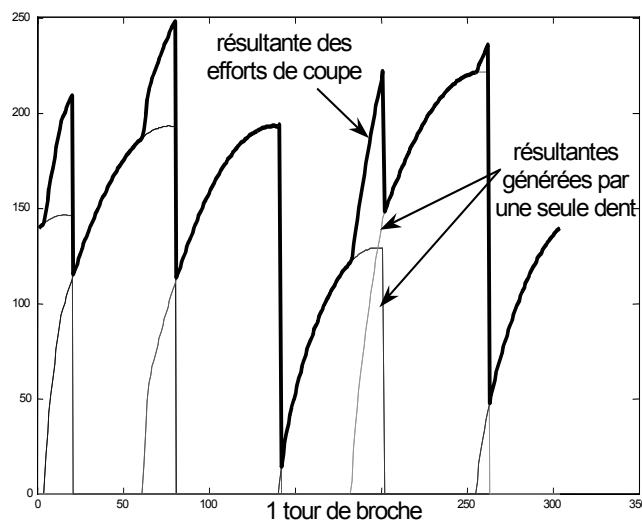


Figure 85. Chevauchement du travail des dents et son effet sur la résultante des efforts de coupe (simulation pour un outil à 5 dents).

Par conséquent, si plusieurs dents sont engagées simultanément dans la matière, une comparaison des pics d'efforts générés au passage de chaque dent donnerait une information erronée quant au battement radial des dents. Néanmoins, comme le simulateur nous permet de prédire les efforts de coupe pour un jeu de conditions de coupe donné, il est possible de prévoir l'erreur dans l'estimation du battement radial des dents et de la compenser.

Notre critère peut donc être généralisé et appliqué lorsque plusieurs dents sont engagées simultanément, tant qu'une compensation est possible. La surveillance d'usinages réalisés avec des outils possédant plus de 3 dents devient donc envisageable. C'est pourquoi nous testerons les améliorations apportées dans ce chapitre avec un outil à 5 dents (cas de figure que nous ne pouvions traiter auparavant).

5. Conditionnement et traitement des signaux

Pour réduire les variations des estimations de l'état de l'outil, il n'est pas question d'agir lors de la phase de préparation de l'usinage. En effet, le système de Surveillance d'Usinage ne doit pas interférer avec le process. Le process de fabrication a été défini en amont, en fonctions de besoins bien précis ; et le SSAU doit s'adapter à lui.

Par contre, l'attention portée au conditionnement des signaux devrait permettre de réduire les variations des estimations de l'état de l'outil (bloc *BI* des diagrammes). En outre, nous allons générer, à partir des signaux d'efforts de coupe, des informations de plus haut niveau afin de connaître quand est ce que l'outil usine, que la coupe est stable, ainsi que de détecter avec précision le passage des dents de l'outil. Pour cela nous remonterons jusqu'à la position angulaire instantanée de l'outil. Les paragraphes suivants synthétisent les développements effectués mais des compléments sont apportées en annexe.

5.1. Filtrage

Au 1.4.2 du chapitre II et au 5.3.1 du chapitre III, nous avons vu qu'il est nécessaire de filtrer les signaux d'efforts mesurés en X et en Y avant de calculer la résultante des efforts de coupe, les mesures étant perturbées par des vibrations. Pour cela, un filtre passe-bas est appliqué. Le paramètre qui doit être réglé avec le plus de soin, est la fréquence de coupure du filtre. Si elle est trop élevée, trop de vibrations vont perturber les signaux et les estimations de l'état de l'outil ne seront pas robustes. A l'inverse, si elle est trop basse, des informations essentielles à l'estimation de l'état de l'outil peuvent être perdues. Nous utiliserons donc les indicateurs de qualité définis au 2^e paragraphe afin de déterminer à quelle fréquence filtrer les signaux d'efforts.

5.2. Détection des zones d'usinage

La méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente compare l'état de l'outil sur les zones où la coupe est stable. Il convient donc de connaître tout d'abord quand est ce que l'outil usine. C'est sur ces zones qu'une entité caractéristique sera extraite des signaux afin d'estimer l'état de l'outil. Ces zones sont détectées grâce à un seuil placé empiriquement à 8 N. Si ce seuil est franchi, le système considère que l'outil est en train d'usiner.

5.3. Détection des zones de coupe stable

La coupe est alors considérée « stable » si les conditions de coupe ne varient pas (actuellement, cette notion de stabilité ne prend pas encore en compte le broutement). Pour détecter cette stabilité (bloc B2 des diagrammes), les valeurs moyennes des efforts sur un tour de broche sont suivies. Une fenêtre glissante est utilisée : si l'étendue des variations des valeurs moyennes des efforts n'excède pas 8 N sur 10 tours de broche, par exemple, la coupe est considérée comme étant stable. Ce réglage est empirique et mériterait d'être approfondi ultérieurement. Les zones de coupe stable sont situées entre les triangles gris sur la Figure 86. Ce n'est que lorsque la coupe est stable que le système de SUI établit un diagnostic quant à l'état de l'outil.

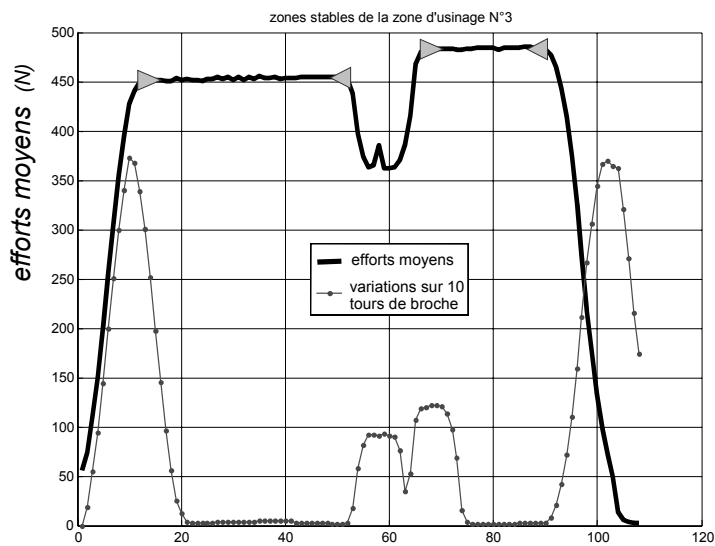


Figure 86. Détection des zones de coupe stable.

5.4. Détection du passage d'une dent

Des améliorations ont été proposées pour extraire les entités caractéristiques (pics d'efforts ou autre) de façon plus robuste (blocs A3 et B3 des diagrammes). Pour cela des hypothèses ont été faites quant à la qualité de l'asservissement de la broche et la position angulaire instantanée de l'outil est reconstruite. On connaît alors en permanence quelle(s) dent(s) est en train d'usiner. En outre, les changements de direction de l'outil nécessitent une correction. En effet, les pics d'efforts générés par une même dent sont supposés être espacés dans le temps d'une période de rotation de la broche, soit $Z \cdot T_c$ (au bruit près). Mais si l'outil change de direction, le pic aura lieu à un instant différent, comme l'illustre la Figure 87.

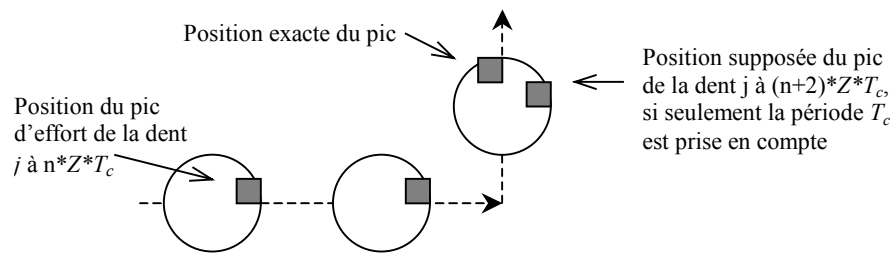


Figure 87. Déphasage des pics d'efforts dû à la direction d'avance.

La Figure 87 illustre l'évolution de la signature des efforts (sur un tour de broche) qui peut alors être observée au cours de l'usinage d'une poche. Un pré-traitement du programme d'usinage est néanmoins nécessaire afin de connaître a priori les conditions de coupe ainsi que la direction d'avance.

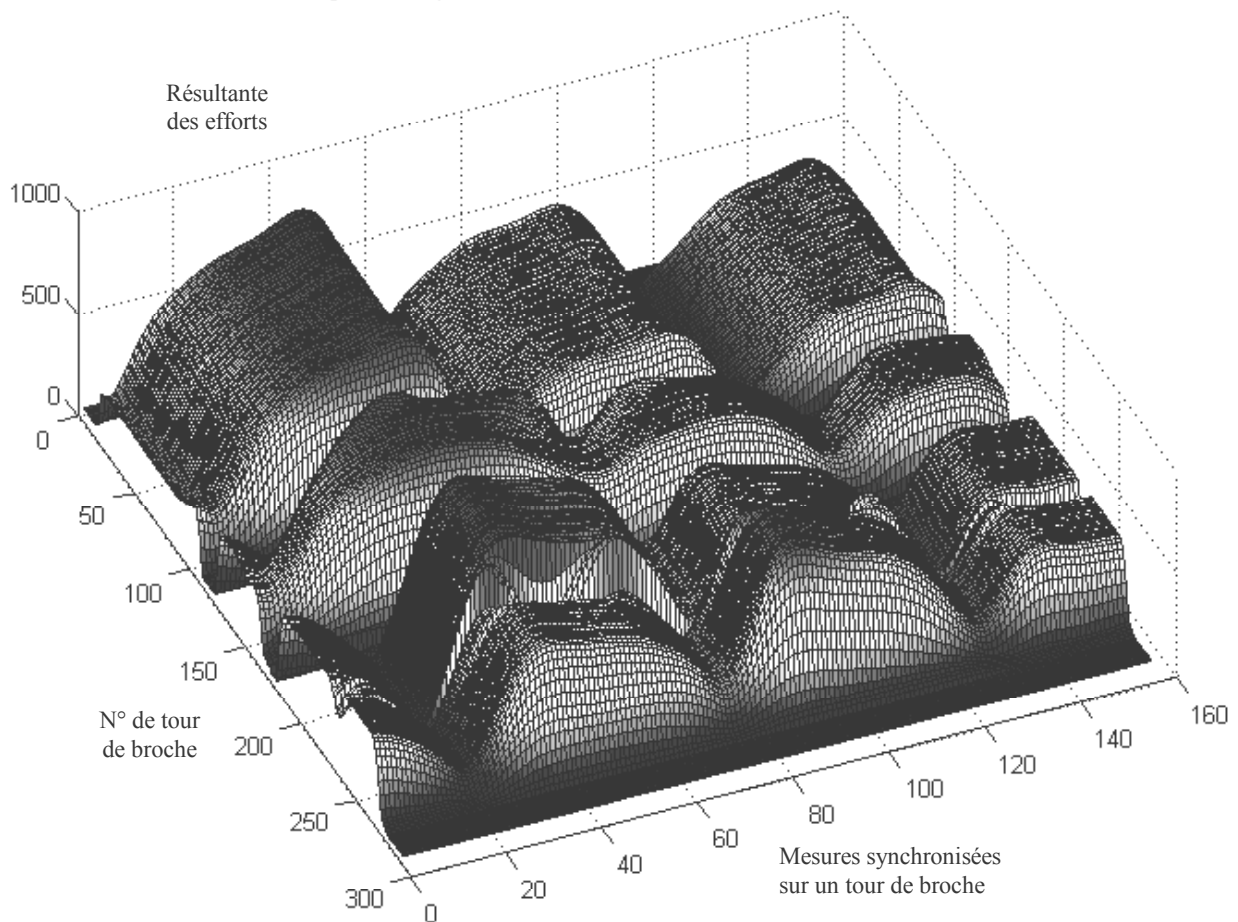


Figure 88. Evolution des efforts tour de broche après tour de broche, après correction de la direction d'avance.

Ces améliorations permettent ainsi de connaître à chaque instant quelle dent est en train d'usiner et ainsi d'extraire avec robustesse la partie des signaux qui semble la plus pertinente pour estimer l'état de l'outil.

6. Entité caractéristique à extraire des signaux

Ce paragraphe concerne les blocs *A3* et *B3* des diagrammes. Jusqu'ici, notre critère de SUI estimait l'état de l'outil à partir des pics d'efforts générés au passage de chaque dent. Nous avons vu que ces pics sont sensibles aux vibrations (Figure 70 du chapitre III page 115). Nous allons donc chercher des alternatives aux pics d'efforts, c'est-à-dire d'autres entités pouvant être extraites des signaux d'effort au passage de chaque dent, qui soient à la fois discriminantes pour détecter des dégradations des dents de l'outil, tout en étant robustes. Pour cela, nous allons considérer davantage de points au passage de chaque dent.

6.1. Valeurs de crête-à-creux

A partir de la Figure 21 du chapitre III, nous avons établi au 1.3.4 du chapitre IV que les valeurs de crêtes-à-creux sont beaucoup plus sensibles aux variations de l'engagement radial que les valeurs de pic d'effort. En outre, afin de calculer la valeur de crêtes-à-creux au passage d'une dent, il faut non seulement extraire le pic des efforts de coupe lors de ce passage, mais également le minimum. Si les valeurs de pics d'efforts sont sensibles aux vibrations, les valeurs de minimums le sont tout autant. Des estimations de l'état de l'outil à partir des valeurs de crêtes-à-creux risquent donc d'être moins robustes qu'avec les pics d'efforts. C'est pourquoi nous écartons cette entité de notre étude.

6.2. Pics d'effort

Les pics d'efforts utilisés jusqu'ici nous serviront de point de comparaison pour déterminer si l'extraction d'une autre entité est plus pertinente ou non. En outre, les améliorations apportées au conditionnement et au traitement des signaux a peut-être amélioré leur pertinence. Nous conservons donc l'entité « pics d'efforts » pour notre étude de robustesse.

6.3. Quasi moyenne des efforts

Altintas et Yellowley [Alt89] dont les travaux ont été présentés au début du chapitre II, utilisent la « quasi moyenne des efforts de coupe » au passage de chaque dent (*quasi-mean*). Il s'agit de la résultante obtenue à partir des valeurs moyennes des efforts de coupe en X et en Y (non filtrés), calculées sur la totalité de la période de passage de la dent. Cette entité est donc intéressante pour une application en temps réel car une seule résultante est calculée par passage de dent, ce qui est moins coûteux. Nous retenons donc aussi cette entité pour notre étude.

6.4. Moyenne autour du pic

Nous avons vu au chapitre III que le pic d'effort contient une information discriminante quant à l'état de l'outil. Cependant sa sensibilité aux vibrations nuit à sa robustesse. Nous allons donc considérer davantage de points en calculant une valeur moyenne autour du pic d'effort.

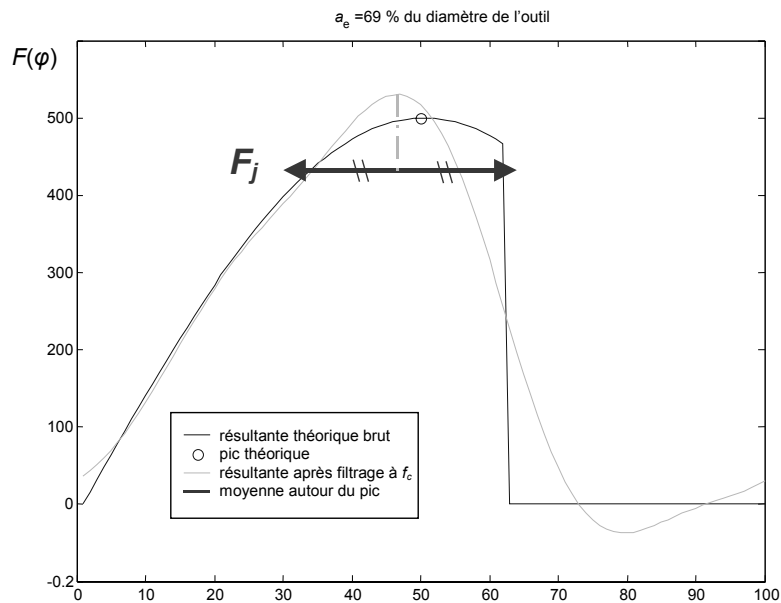


Figure 89. Extraction de l'entité « moyenne autour du pic » au passage d'une dent.

La méthode d'extraction d'entités « à période constante » (présentée en annexe au paragraphe 4.7.2) est utilisée pour cette entité. Le pic de la résultante des efforts de coupe filtrés à 1 fois la fréquence de passage des dents est détecté (une seule fois par passe). La valeur moyenne de la résultante (normalement issue du filtrage à $2f_c$) est alors calculée de part et d'autre de ce pic (pendant 55% de la période de passage des dents par exemple), à chaque passage de la dent. Il sera intéressant d'étudier la durée sur laquelle la moyenne doit être calculée, ainsi que la fréquence à laquelle on doit filtrer.

6.5. Moyenne dent en prise

La moyenne autour du pic repose sur la présence d'un pic au passage de la dent, sur la résultante des efforts de coupe. Or, nous l'avons vu, cette donnée n'est pas nécessairement pertinente lorsque l'outil possède plus de 3 dents et que plusieurs dents sont engagées simultanément dans la matière. En se basant sur une extraction d'entité à partir de la position angulaire de la broche, il est possible de placer plus pertinemment l'intervalle sur lequel une moyenne des efforts est calculée lors du passage d'une dent.

Suite à la procédure d'étalonnage, des simulations numériques peuvent être réalisées pour n'importe quelles conditions de coupe. Il est alors possible de déterminer quand chaque dent usine. Pour cela, la résultante des efforts générés *par une seule dent*, est calculée après filtrage, Figure 90. Ensuite, la zone où les efforts sont supérieurs à un certain seuil (la moitié de la valeur du pic par exemple), est recherchée. Cette zone précisera l'intervalle des positions angulaires de la broche où la dent travaille le plus. C'est sur cette zone que sera calculée la moyenne de la résultante des efforts de coupe (la vraie cette fois-ci, où toutes les dents usinent). Cette entité sera nommée « moyenne dent en prise ».

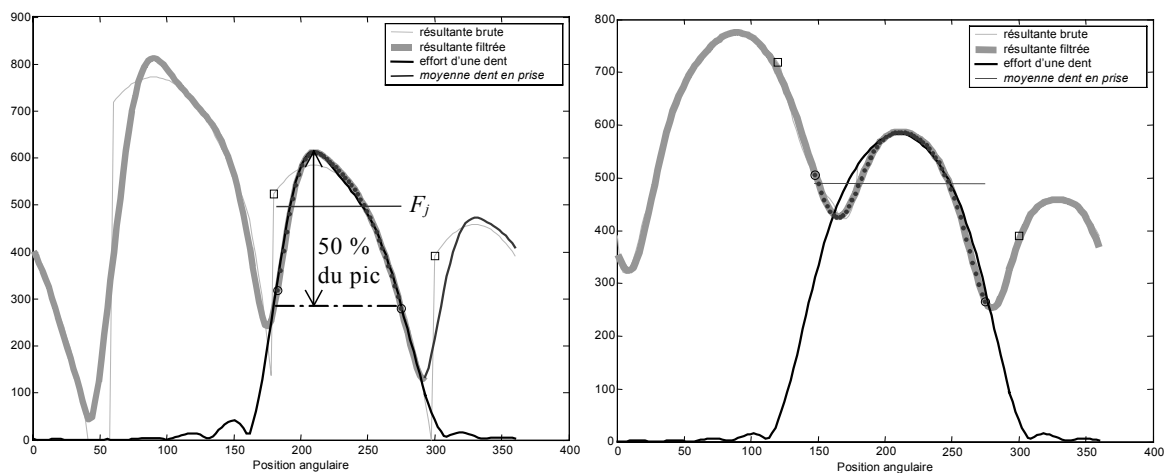


Figure 90. Calcul de l'entité « moyenne dent en prise » pour la dent N°2 et un seuil réglé à 50% ($a_e = 76\%$ à gauche, 100% à droite).

Contrairement à l'extraction d'une moyenne autour des pics (pendant une durée fixe), cette méthode permet d'adapter la durée où la moyenne est calculée en fonction des conditions de coupe (de l'engagement radial et du battement des dents principalement), de sorte à extraire des signaux la zone la plus pertinente pour chacune des dents. Il sera intéressant de déterminer où placer le seuil de détection de l'usinage d'une dent.

6.6. Application aux efforts

Nous allons maintenant illustrer l'intérêt du choix de l'entité à extraire des signaux d'efforts, en comparant les valeurs réelles et théoriques (obtenues respectivement par les blocs B3 et A3). Les signaux mesurés lors de la série d'essais C avec l'outil à 2 dents (ayant un battement radial important) ont ainsi été traités. La fréquence de coupure du filtre est ici fixée à 2 fois la fréquence de passage des dents. Les 4 entités présentées précédemment en sont ensuite extraites. Les données simulées sont représentées par les surfaces de couleur plus claires, pour chacune des 2 dents (Figure 91). Ces valeurs sont mises en regard des mêmes entités, cette fois-ci extraites des signaux mesurés lors des expérimentations (surfaces plus foncées).

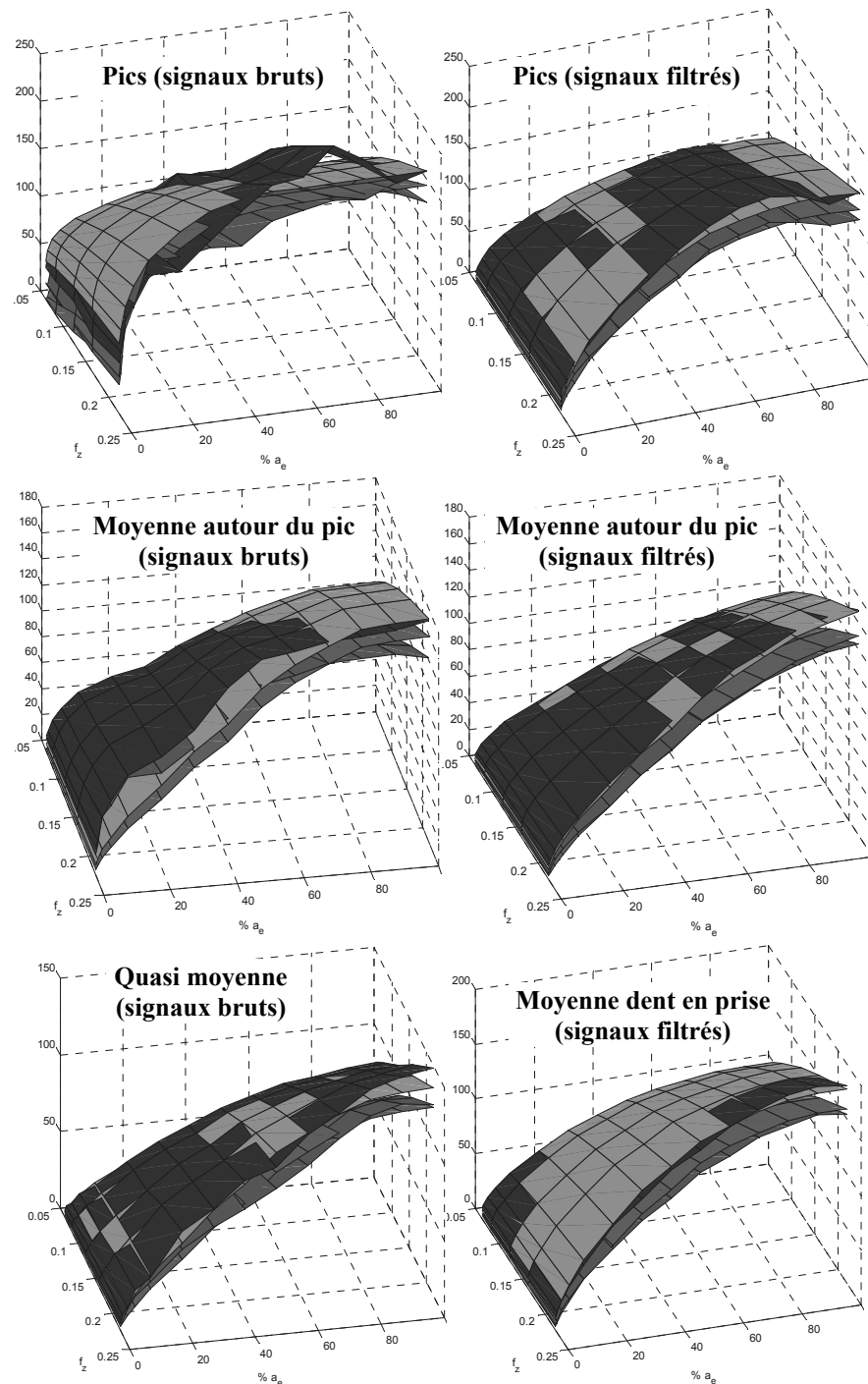


Figure 91. Comparaison des différentes entités caractéristiques, extraites à la fois de signaux expérimentaux et simulés (pour les conditions de coupe de la série d'essais C, avec l'outil à 2 dents ayant un battement radial important, filtrage à $2.f_c$)

Il est notable que les écarts entre simulations et expérimentations (pour des conditions de coupe différentes) diffèrent d'un type d'entité caractéristique à un autre. Leur choix est donc particulièrement important pour la robustesse du système de Surveillance d'Usinage Intermittente. Au vu de la Figure 91, le filtrage semble important et les entités « moyenne autour du pic » et « moyenne dent en prise » semblent plus pertinentes que les pics d'efforts.

7. Correction des estimations

Il s'agit là du bloc B5 des diagrammes.

7.1. Principe

Suite à l'extraction des entités caractéristiques, le critère est calculé. Nous avons observé au chapitre précédent des variations modérées et régulières des estimations de battement radial en fonction des conditions de coupe. Le simulateur d'efforts que nous avons développé, a permis d'expliquer et donc de prédire ces variations (au paragraphe 3.3).

En analysant le programme ISO d'une pièce, il est possible de connaître *a priori* les conditions de coupe lors de l'usinage de cette pièce. Il est aisé de calculer les valeurs théoriques de l'engagement radial et axial de l'outil (cf. chapitre II). Ces valeurs seront proches des conditions de coupe réelle (sauf lors des passes d'écroûtage ou de blanchiment, du fait des variations dimensionnelles des bruts). Par contre, une connaissance *a priori* de la vitesse d'avance nécessite de bien connaître la dynamique de la machine. La prédiction de l'avance réelle est ainsi plus complexe mais faisable [Dug02]. Suite à la phase d'étalonnage, le simulateur peut alors prédire les efforts de coupe et les estimations de battement radial qui résulteront de l'usinage (blocs A2 à A4 des diagrammes). Il est donc envisageable de compenser les variations intempestives des estimations qui sont dues aux changements de conditions de coupe (Figure 76). Ainsi les variations qui sont réellement dues à un endommagement de dent de l'outil seront détectées avec davantage de précision et de fiabilité.

Ces compensations reviennent à recalculer les estimations à une même valeur. Le plus logique est que la compensation soit effectuée par rapport à la valeur de battement radial simple des dents qui a été identifiée lors de l'étalonnage et qui est introduite dans le simulateur d'efforts ($\varepsilon_{j\text{sim}}$). En effet, cette donnée a une réalité physique et un réel impact sur la signature des efforts.

7.2. Que corriger ?

Les efforts sont proportionnels à l'engagement axial et la formulation du critère permet de corriger directement les estimations à partir d'une connaissance *a priori* de l'engagement axial.

L'application du critère aux signaux d'efforts de la série d'essais B (pour les outils possédant 2, 3 et 4 dents) a montré au 5.3.2 du chapitre III que les variations sont importantes lorsque l'engagement radial varie. Les estimations tendent vers zéro lorsque a_e tend vers zéro. Ces variations sont donc particulièrement problématiques lorsque le battement radial des dents est

important. Il est donc nécessaire de corriger les estimations à partir d'une connaissance a priori de l'engagement radial.

L'étendue des variations des estimations dues à l'avance est plus faible. Les estimations tendent à augmenter lorsque l'avance est faible, Figure 92. En outre, l'obtention a priori d'une valeur proche de l'avance réelle est plus complexe. Enfin, les variations de l'avance lors de l'usinage sont relativement brusques (lors de virages par exemple). Dans le cadre du système de Surveillance d'Usinage Intermittente, la surveillance risque d'être suspendue sur ces zones. Il conviendra donc de se demander, lors de l'étude de robustesse, si une correction des estimations de battement radial par rapport à l'avance, est bien rentable.

Quant à la vitesse de coupe, elle est généralement constante durant toute une opération d'usinage de la pièce par un même outil. C'est à cette vitesse que l'étalonnage est réalisé. Il est donc inutile d'envisager de corriger les estimations par rapport à la vitesse de coupe.

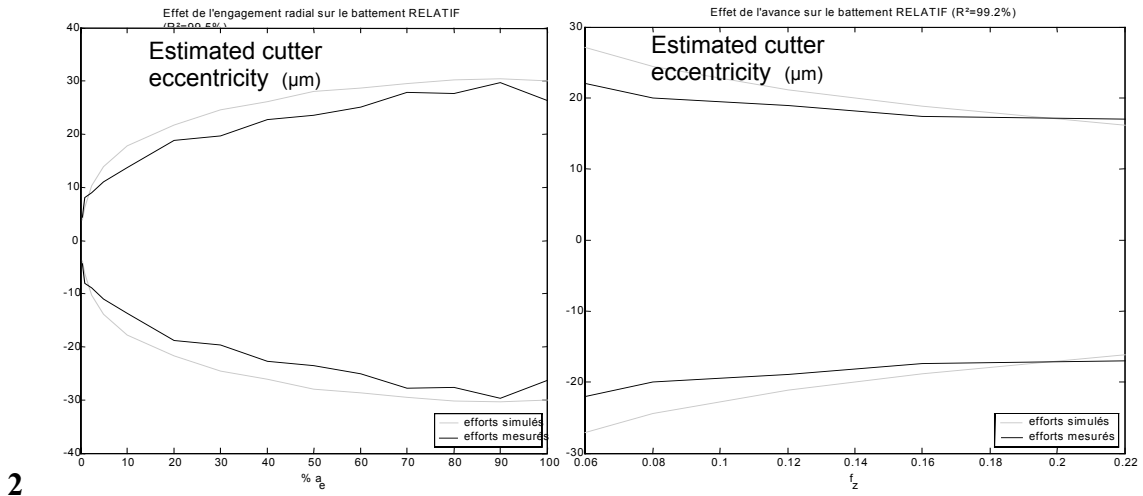


Figure 92. Effet moyen de l'engagement radial (à gauche) et de l'avance (à droite) sur les estimations de battement radial relatif (essais C avec l'outil à 2 dents).

Vaut-il mieux corriger les estimations de battement simple ou relatif ? Pour un outil à 2 dents, la question ne se pose pas car $\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_2$. Dans les autres cas, effectuons un calcul d'incertitude, où Δ_F , Δ_{ε_j} et $\Delta_{\Delta\varepsilon_j}$ sont respectivement les incertitudes sur les mesures de pics d'effort et les estimations de battement radial simple et relatif. Sous l'hypothèse que la variation des pics d'efforts Δ_F est la même pour toutes les dents, on peut montrer que :

$$\Delta_{\varepsilon_j} = \Delta_{\Delta\varepsilon_j} = \frac{2(Z-1)}{Z.K.a_p} \Delta_F \quad 52$$

On peut donc indifféremment choisir de corriger le battement simple ou relatif. Comme le battement simple comporte $Z-1$ valeurs au lieu de Z , c'est lui qui sera corrigé.

Nous allons maintenant envisager de corriger en procédant soit à un ajout, soit à la multiplication par un ratio. Nous étudierons également s'il faut corriger ou non en fonction de la vitesse d'avance instantanée.

7.3. Correction par un ratio

Afin de corriger les variations des estimations dues à l'avance et à l'engagement radial, il est possible de multiplier par un ratio :

$$\varepsilon_{ji}^{corr}(n) = \varepsilon_{ji}(n) \frac{\varepsilon_{jsim}}{\widetilde{\varepsilon_{ji}}} \quad 53$$

ε_{jsim} est la valeur de battement simple identifiée lors de l'étalonnage qui est ensuite introduite dans le simulateur d'efforts. Avant de lancer l'usinage, les efforts sont simulés, les entités caractéristiques sont extraites et le critère donne alors une estimation du battement radial simple des dents $\widetilde{\varepsilon_{ji}}$ (pour chaque dent j et pour chaque jeu de conditions de coupe i allant être rencontré au cours de l'usinage de la pièce). Ces 2 valeurs de battement radial simple forment alors le terme correctif sous la forme d'un ratio. Ce ratio permet de corriger l'estimation $\varepsilon_{ji}(t)$ réalisée à partir des signaux d'efforts mesurés à chaque tour de broche n , lors de l'usinage.

Néanmoins, si le battement radial d'une dent est faible, les estimations avant correction pourraient valoir par exemple $+3^{+/-7}$ μm (elles varient donc entre -4 et $+10$ μm). Or, en corrigeant par un ratio tel que 5, les estimations varieraient entre -20 et $+40$ μm après correction. L'étendue des variations augmenterait alors ; contrairement à ce nous souhaitons. C'est pourquoi, dans notre étude de robustesse, nous avons pris en compte des outils possédant des battements radiaux faibles et importants. Ce type de correction risque également de poser le problème de l'hétéroscédasticité (non-homogénéité de la variance des échantillons). Si les variances des estimations sont du même ordre de grandeur avant correction, les variances des estimations varient en fonction des conditions de coupe après correction (Figure 93). En effet, lorsque l'épaisseur nominale de copeau est faible, le ratio est supérieur à 1 et augmente d'autant la variance. De même, lorsque l'épaisseur nominale de copeau est importante, le ratio est inférieur à 1 et diminue d'autant la variance. Or, afin de détecter des endommagements des dents de l'outil, nous souhaitons placer des seuils de part et d'autre des valeurs du battement radial sur l'outil neuf, en fonction de l'écart-type de l'ensemble de la population des estimations de battement. L'hétéroscédasticité risque donc d'être source de détections abusives.

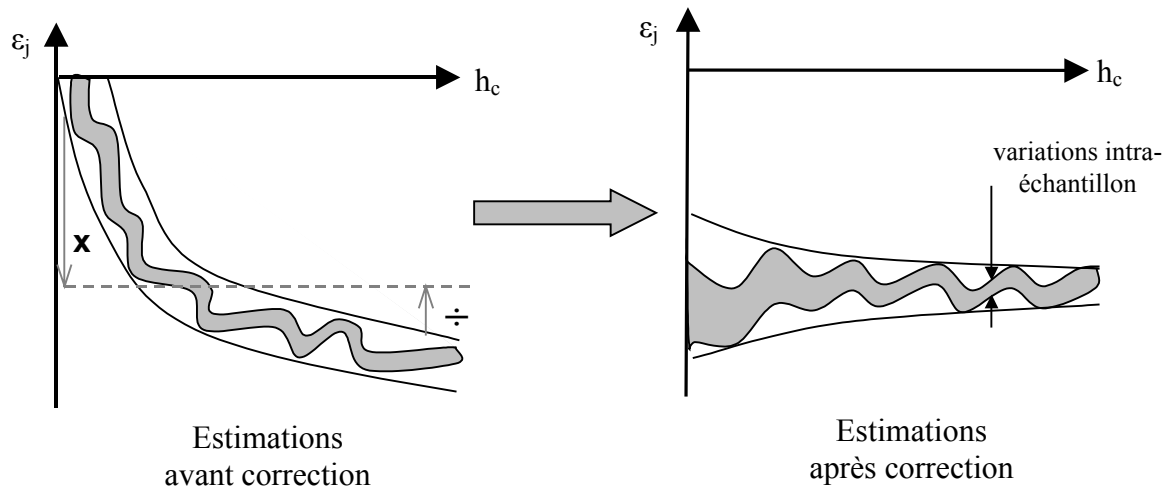


Figure 93. Effet de la correction par ratio sur la variance des estimations.

Pour les deux risques que nous venons d'évoquer, nous avons associé à notre étude de robustesse, une alternative à la correction par ratio (présentée au prochain paragraphe).

7.4. Correction par un ajout

Afin de compenser les variations des estimations dues à l'avance et à l'engagement radial, il est possible d'ajouter un terme correctif (les notations sont identiques à celles du paragraphe précédent).

$$\varepsilon_{ji}^{corr+}(n) = \varepsilon_{ji}(n) + \varepsilon_{jsim} - \widetilde{\varepsilon}_{ji} \quad 54$$

L'homoscédasticité est garantie, avec ce terme additif. Des seuils de détection de bris pourront être placés en fonction de l'écart-type de la population des estimations. En cas de battement radial faible, la Figure 94 montre bien qu'il est préférable de corriger les estimations par un ajout.

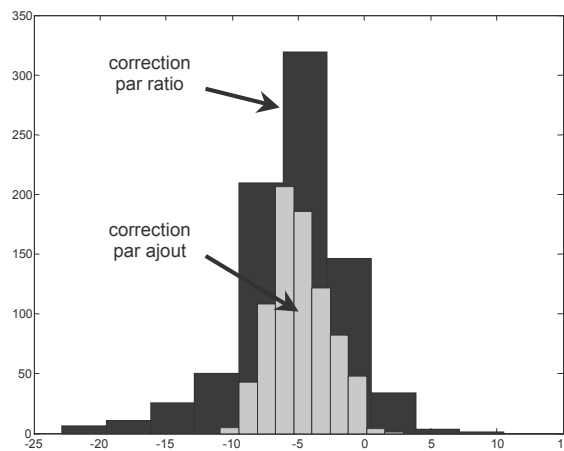


Figure 94. Comparaison des histogrammes représentant les estimations d'un faible battement radial, après une correction par ratio ou bien par ajout (large gamme de conditions de coupe).

Nous proposons de placer des seuils fixes de part et d'autre des estimations corrigées par un ajout. Les estimations sont donc translatées pour s'adapter au seuil.

Certains auteurs proposent des seuils adaptatifs, en fonction des conditions de coupe. Dans ce cas, ce sont les seuils qui sont translatés pour s'adapter aux estimations. Ces deux approches sont donc rigoureusement identiques. Néanmoins, l'objectif à terme est de mettre en œuvre cette méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente sur des machines de productions industrielles. Dans l'atelier, l'opérateur doit effectuer de nombreuses tâches. Ainsi, d'un simple coup d'œil au système de Surveillance d'Usinage, il doit pouvoir comprendre si l'usinage se déroule correctement ou non. Or, si des seuils adaptatifs bougent en permanence, ce n'est pas trivial ; alors qu'avec des seuils fixes, l'opérateur peut rapidement contrôler l'évolution des estimations de l'état de l'outil.

Par ailleurs, suite à une correction par ajout, toutes les estimations sont supposées identiques et suivent une loi Normale. Il est donc possible d'appliquer des outils statistiques tels que l'écart-type ou le rapport signal sur bruit, afin d'évaluer la qualité du système. Nous préférons donc effectuer une correction par ajout, plutôt que d'utiliser des seuils adaptatifs.

L'étude de robustesse testera donc les corrections par ratio et par ajout, en prenant en compte ou non les variations de l'avance pour cette dernière.

8. Détermination d'une configuration robuste du système de S.U.I.

8.1. Conditionnement et traitement de signaux

Dans les paragraphes précédents de ce chapitre, nous avons vu comment les éléments de la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente peuvent être améliorés. Nous avons retenu 5 facteurs pouvant influencer sur la robustesse du système :

1. la fréquence de coupure du filtre passe-bas,
2. l'entité à extraire des signaux (pic, moyenne autour du pic, moyenne dent en prise et quasi-moyenne),
3. la durée pendant laquelle la moyenne est calculée autour du pic, à chaque passage de dent,
4. le type de correction des estimations (par ratio, ajout, avec ou sans prise en compte de l'avance),
5. la fonction coût de la boucle d'optimisation lors de l'étalonnage.

Nous allons maintenant définir les niveaux des facteurs étudiés. Pour ce qui est du filtrage, le premier niveau du facteur correspond à l'utilisation de signaux d'efforts bruts. Les 6 niveaux suivants correspondent à un filtrage de type passe-bas des signaux en coupant respectivement à 4, 3, 2½, 2, 1½ et 1 fois la fréquence de passage des dents. Dans le domaine fréquentiel, la composante située à la fréquence de passage des dents comportant l'information sur le battement radial des dents, il serait incohérent de filtrer davantage, comme nous l'expliquerons par la suite.

Pour le paramètre correspondant à la durée pendant laquelle la moyenne autour du pic est calculée, le 1^{er} niveau correspond à l'extraction d'un pic et les 5 niveaux suivants correspondent au calcul de la moyenne autour du pic durant respectivement 10, 20, 33, 50, 66, 75, 85 et 100 % de la période de passage des dents. Lorsqu'il s'agit de calculer l'entité « moyenne dent en prise », la durée pendant laquelle la moyenne est calculée s'adapte en fonction de l'engagement radial et du battement des dents. La Figure 90 précise que la zone où la moyenne est calculée, est déterminée par simulation numérique. Elle s'adapte en fonction de l'engagement radial et du battement des dents et correspond à la zone où la dent génère des efforts supérieurs à 10% de moins que la valeur du pic, par exemple pour le 2^e niveau de notre facteur. Les résultats seront donc comparables à ceux obtenus pour l'entité « moyenne autour du pic ».

Les estimations de battement radial seront corrigées soit par un ratio, soit par l'ajout d'un terme prenant en compte ou non l'effet de l'avance sur les estimations de battement radial (soient 3 niveaux).

Chaque configuration du système de S.U.I. correspond à un réglage particulier de ces 5 facteurs. Nous allons régler ces paramètres pour que le système soit le plus robuste possible. Nous allons étudier un nombre important de niveaux pour chaque facteur. Ils permettront tout d'abord d'écarter les réglages les moins pertinents. Dans un second temps, nous discuterons du réglage adéquat de chacun des facteurs, en nous appuyant sur l'étude de robustesse du système.

8.1.1. Robustesse des entités extraites

Nous avons défini un premier rapport Signal sur Bruit S/N_F . Ce rapport teste la robustesse des simulations en comparant les entités extraites des signaux d'efforts expérimentaux et celles extraites des signaux simulés (blocs A3 et B3 des diagrammes), pour une configuration donnée du système de Surveillance d'Usinage Intermittente. Nous avons tout d'abord fixé la fonction coût de l'étalonnage à son niveau le plus classique : le modèle d'effort est étalonné à partir de la comparaison des signatures expérimentales et simulées de la résultante des efforts (sur un tour de broche complet). Les résultats obtenus en traitant les 70 passes ($14 a_e \times 5 f_z$) usinées avec l'outil à 2 dents (avec battement important) de la série d'essais C, sont présentés dans le Tableau 12, en

fonction du type d'entité extraite (en gras), de la durée pendant laquelle la moyenne est calculée pour chacun entité, ainsi que du conditionnement des signaux (en italique).

S/N_F (dB)			Quasi-moyenne (brut)	Conditionnement des données							
				Signaux bruts	Filtrage à $4.f_c$	Filtrage à $3.f_c$	Filtrage à $2\frac{1}{2}.f_c$	Filtrage à $2.f_c$	Filtrage à $1\frac{1}{2}.f_c$	Filtrage à $1.f_c$	Filtrage à $\frac{1}{2}.f_c$
entité caractéristique extraite à chaque passage de dent	durée de la moyenne autour du pic (% T_c)	pic	-30	-26	-24	-23	-22	-18	-12	-11	-6
		10	-25	-24	-24	-22	-19	-15	-12	-11	-7
		20	-20	-22	-22	-20	-18	-14	-12	-11	-7
		33	-16	-23	-22	-19	-17	-13	-11	-11	-7
		40	-17	-24	-22	-20	-18	-12	-10	-10	-7
		50	-17	-25	-23	-20	-17	-12	-9	-10	-6
		66	-16	-26	-24	-21	-18	-11	-8	-9	-6
		75	-16	-26	-25	-22	-18	-11	-8	-9	-6
		85	-15	-27	-25	-22	-19	-11	-7	-8	-6
		100	-13	-27	-25	-23	-19	-11	-7	-7	-6
	seuil de l'entité moyenne dent en prise (% pic)	1	/	-25	-24	-23	-22	-16	-11	-11	-7
		10		-23	-22	-21	-20	-14	-11	-10	-7
		20		-23	-21	-19	-18	-13	-10	-10	-7
		33		-23	-20	-18	-16	-12	-10	-9	-6
		40		-23	-19	-18	-16	-12	-10	-9	-6
		50		-22	-19	-17	-15	-11	-10	-9	-6
		66		-21	-19	-17	-15	-11	-9	-8	-6
		75		-21	-19	-17	-15	-11	-9	-8	-6
		85		-21	-20	-18	-16	-11	-8	-7	-5
		100		-19	-21	-19	-17	-11	-8	-6	-5

Tableau 12. Robustesse de l'entité extraite des signaux d'effort en fonction du conditionnement des signaux, au travers du rapport Signal/Bruit S/N_F .

Plus un rapport Signal/Bruit est élevé, plus la configuration du système de SUI est robuste. On s'aperçoit que le paramètre qui a le plus d'effet sur la robustesse est la fréquence de coupure du filtre passe-bas. Les résultats suggèrent que, pour être robuste, il faut filtrer le plus possible (de mêmes résultats ont également été obtenus avec d'autres outils). Cependant, si l'on filtre en dessous de la fréquence de passage des dents, comme suggéré par cet indicateur de qualité, l'information portant sur le battement radial des dents de l'outil va être en grande partie supprimée. Or, c'est justement sur cette information que notre système de surveillance d'usinage est basé. L'indicateur de qualité S/N_F peut donc nous donner une information sur l'adéquation entre simulations et expérimentations au niveau des efforts, mais il ne nous permettra pas de définir la configuration la plus robuste de notre système de SUI. C'est pourquoi nous avons défini un autre indicateur, plus pertinent et mieux adapté à notre problématique, qui est d'estimer avec robustesse l'état de l'outil (quelles que soient les conditions de coupe). Il s'agit du rapport S/N_e , qui traite de la robustesse des estimations du battement radial des dents (et non de la qualité des simulations d'efforts comme S/N_F).

8.1.2. Robustesse des estimations de l'état de l'outil – étape 1

Lors d'une première étape, fixons la fonction coût de l'étalonnage à son niveau le plus classique, en renseignant le modèle d'effort à partir de la comparaison des signatures expérimentales et simulées de la résultante des efforts de coupe.

Pour un outil donné, les estimations de battement radial simple sont réalisées à partir d'un jeu de 70 conditions de coupe (a_e, f_z) pour lesquelles une passe rectiligne a été usinée et 60 tours de broche sont traités (lorsque la coupe est stable). Parmi ces 70 passes, 4 sont les passes d'étalonnage. Elles permettent d'étalonner le modèle d'efforts et de simuler les efforts de coupe, en vue de corriger les estimations de battement radial pour les 70 jeux de conditions de coupe. Les estimations de battement radial ainsi obtenues à partir des signaux expérimentaux sont corrigées et forment une population gaussienne dont on peut calculer le rapport signal sur bruit S/N_e . Ce rapport détermine alors le niveau de robustesse de la configuration du système considérée.

Afin que les résultats obtenus ne soient pas sensibles à un outil donné, chaque configuration est appliquée à 3 outils différents. Pour chacun d'eux, 70 passes ont été usinées avec des plaquettes neuves, soient 210 passes en tout. Il s'agit des essais de la série d'expérimentations C. Le premier outil est un outil à 2 dents avec un battement radial simple important ($\varepsilon_1=0, \varepsilon_2=-22 \mu\text{m}$). Le 2^e est un outil à 2 dents avec un faible battement radial ($\varepsilon_1=0, \varepsilon_2=-4 \mu\text{m}$). Enfin, le 3^e outil comporte 3 dents, avec un battement faible et l'autre important ($\varepsilon_1=0, \varepsilon_2=+9 \mu\text{m}, \varepsilon_3=-51 \mu\text{m}$). Comme le battement de la dent 1 est toujours défini comme étant nul, 3 de ces 7 battements sont toujours nuls (au total pour les 3 outils). Ainsi, seulement 4 valeurs de battement sont estimées en tant que telles. Par conséquent, la robustesse de chaque configuration du système est déterminée à partir de 4 rapports S/N_e .

Pour chaque configuration, la moyenne des 4 rapports S/N_e (correspondants aux 4 battements simples estimés) est calculée. Cette valeur moyenne repose donc sur 210 passes usinées par 3 outils différents, où une soixantaine de tours de broches ont été traités. Elle est représentée par un point sur les Figure 95 à Figure 97, selon l'entité extraite (2 surfaces pour les entités « moyenne autour du pic » et « dent en prise » et 1 ligne pour la « quasi-moyenne »), la fréquence de coupure du filtre en X et la durée de la moyenne autour du pic en Y. Plus la valeur de S/N_e est élevée, plus la configuration est robuste.

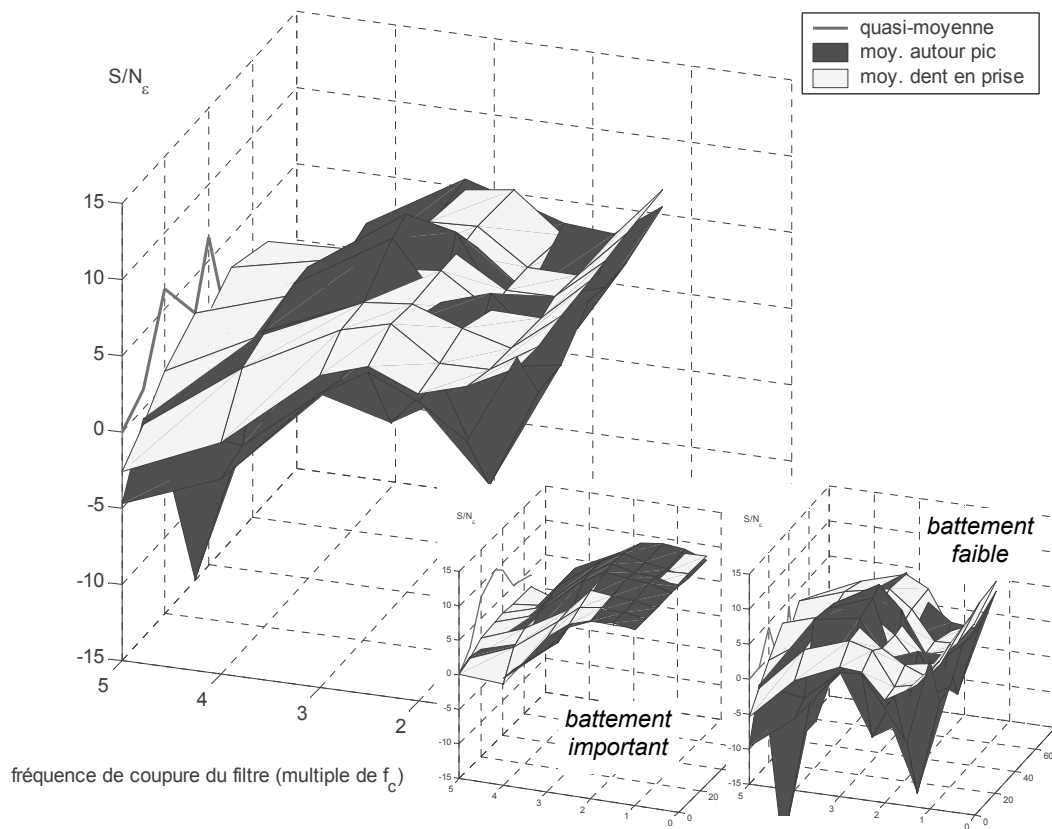


Figure 95. Robustesse de la correction par ratio
(en distinguant l'ordre de grandeur du battement sur les miniatures).

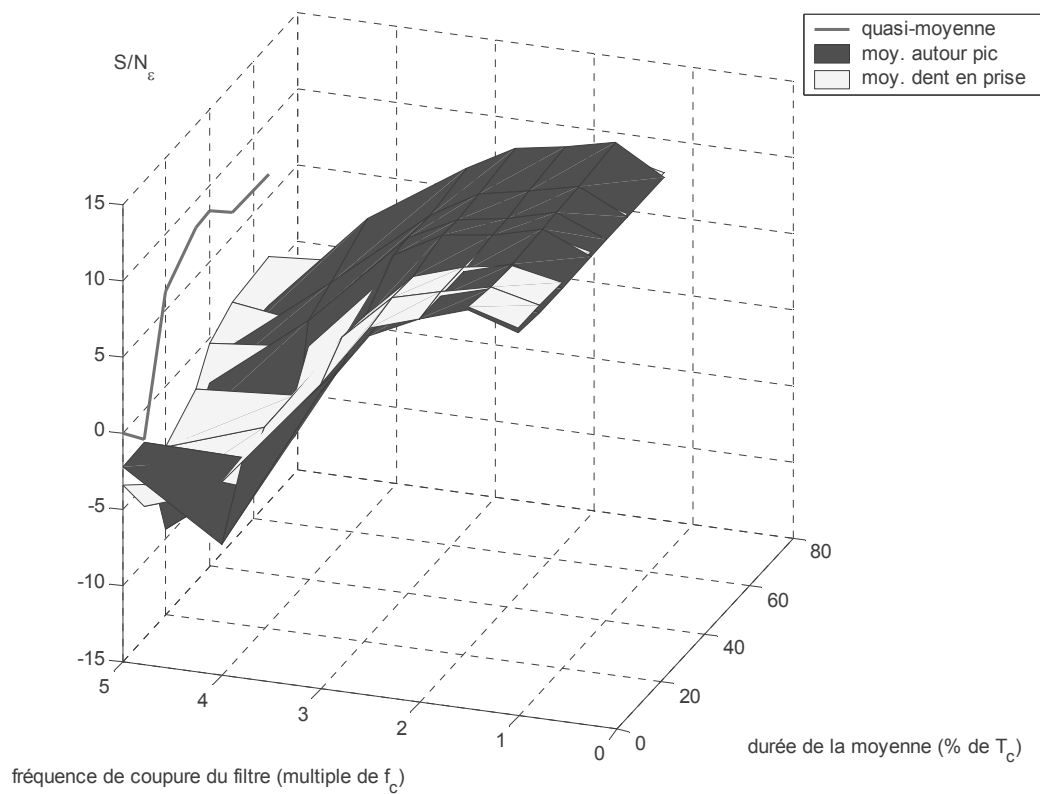


Figure 96. Robustesse de la correction par ajout, prenant en compte l'effet de l'avance.

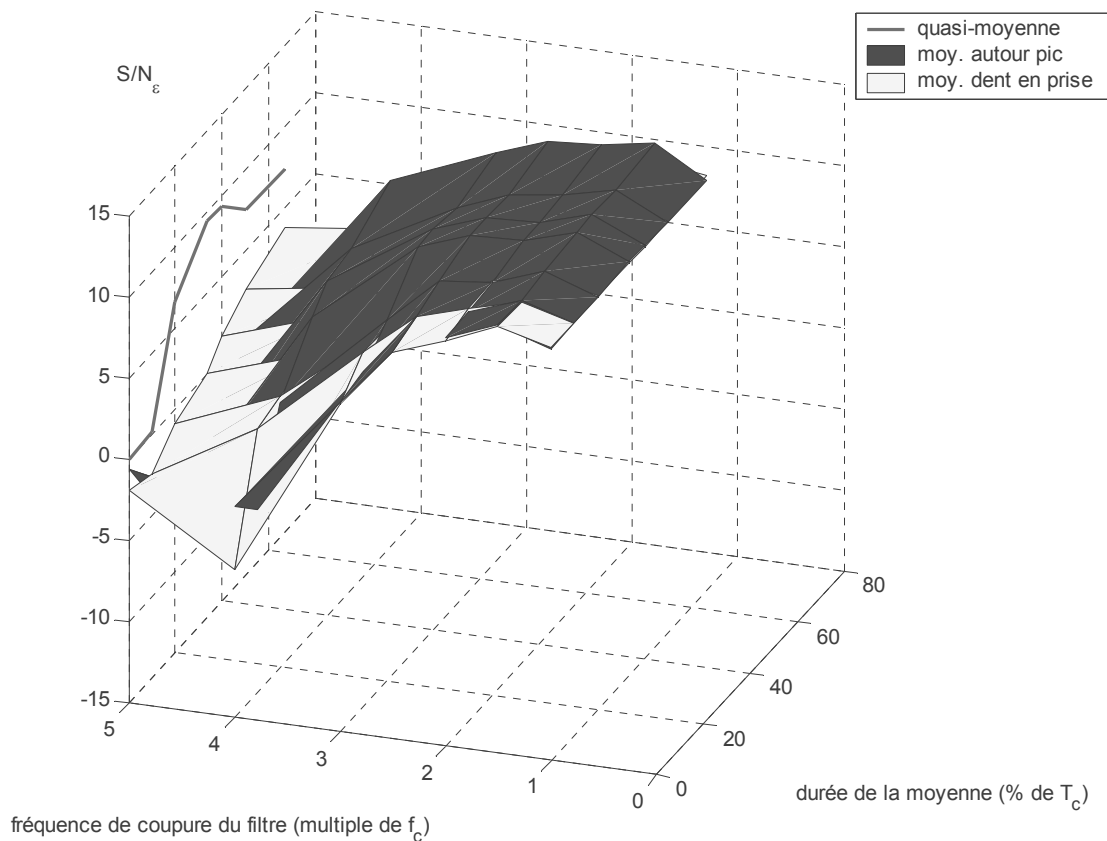


Figure 97. Robustesse de la correction par ajout, ne prenant pas en compte l'effet de l'avance.

Nous pouvons tout d'abord constater que le facteur le plus important est la fréquence de coupure du filtre passe-bas, car il fait varier d'une dizaine de dB la robustesse du système. Les graphes indiquent qu'il convient de filtrer le plus possible mais que la composante située à f_c doit rester présente dans les signaux. Nous filtrerons désormais en coupant à $1\frac{1}{2}$ fois la fréquence de passage des dents. Les entités calculées à partir des signaux bruts (comme la quasi-moyenne) sont par conséquent écartées.

8.1.3. Robustesse des estimations de l'état de l'outil – étape 2

Après avoir réglé ce paramètre prépondérant qu'est le filtrage, nous allons rajouter à notre étude l'influence de la fonction coût de l'étalonnage sur la robustesse. Le 1^{er} niveau est celui appliqué à l'étape précédente (comparaison des signatures d'efforts sur un tour de broche). Les 6 niveaux suivants consistent à faire évoluer la pondération entre le respect des pics d'efforts et le respect des écarts entre les pics de dents adjacentes (ceci est appliqué aux pics d'effort ou aux autres entités caractéristiques). Le paramètre λ de l'équation 44 prendra les valeurs : 0, 1, 10, 25, 50 et 100.

En analysant les résultats alors obtenus, on s'aperçoit que 2 des paramètres devant encore être réglés, ont moins d'influence sur la robustesse du système que les autres : il s'agit de la fonction coût et de la durée pendant laquelle la moyenne autour du pic est calculée (amplitude des variations de moins de 1,5 dB).

Nous pouvons donc calculer les effets moyens des autres réglages sur la robustesse (quelles que soient la fonction coût et la durée de la moyenne ; ces 2 paramètres seront réglés ensuite). On obtient le Tableau 13 :

S/N_e (dB)	Moyenne autour du pic	Moyenne dent en prise
Correction par ratio	6.1	5.3
Correction par ajout	11.4	11.1
Correction par ajout (sans V_f)	12.1	11.4

Tableau 13. Rapport S/N_e moyen en filtrant à $1 \frac{1}{2} f_c$.

A la première ligne, du fait de l'écart important entre les valeurs correspondant à une correction par ajout ou par ratio, nous allons écarter la correction par ratio. Un écart de -6 dB correspond à un bruit multiplié par 2. Ainsi, la correction par ratio s'avère trop peu robuste ; ceci est principalement dû aux cas où le battement radial est faible (cf. miniatures de la Figure 95). Par contre, les corrections par ajout présentent des niveaux de robustesse similaires, voire même légèrement supérieurs lorsque l'avance n'est pas prise en compte lors de la correction. Or, ceci présente un sérieux avantage dans l'optique de développer et mettre en œuvre une application en temps réel de notre système de Surveillance d'Usinage Intermittente. En effet, au cours de l'usinage d'une pièce, les variations de l'avance sont beaucoup plus fréquentes que celles de l'engagement axial et radial de l'outil. Leur prise en compte est donc très contraignante. Par conséquent, nous corrigerons seulement les variations d'engagement axial et radial, sans même perdre en robustesse.

Le Tableau 13 nous apprend également que les entités « moyenne autour du pic » et « moyenne dent en prise » sont sensiblement aussi robustes l'une que l'autre. Or, l'algorithme d'extraction des « moyennes autour du pic » peut diverger lorsque plusieurs dents sont engagées simultanément dans la matière. En effet, dans ce cas, il n'y a plus un pic net, généré au passage de chaque dent, et donc la notion de pic n'est plus pertinente. A contrario, l'entité « moyenne dent en prise » présente l'énorme avantage d'être la seule à pouvoir surveiller des usinages réalisés avec des outils possédant plus de 3 dents. En contrepartie, son extraction nécessite de connaître la position angulaire de l'outil à chaque instant mais nous avons vu que cela est

possible, même si l'on ne dispose pas de mesures de codeur de broche. Dorénavant, nous travaillerons donc avec l'entité « moyenne dent en prise », afin d'estimer de manière robuste l'état de l'outil.

Il reste donc à régler le paramètre définissant quand une dent est en prise, ainsi que la fonction coût. Ces paramètres ont peu d'influence sur la robustesse du système, comme nous pouvons le constater sur la Figure 98. Comme pour le choix des 2 précédents facteurs, nous serons donc libres de suivre ou non ce que nous suggère le calcul, et nous discuterons des raisons autres que la robustesse, qui méritent d'être prises en compte lors du choix.

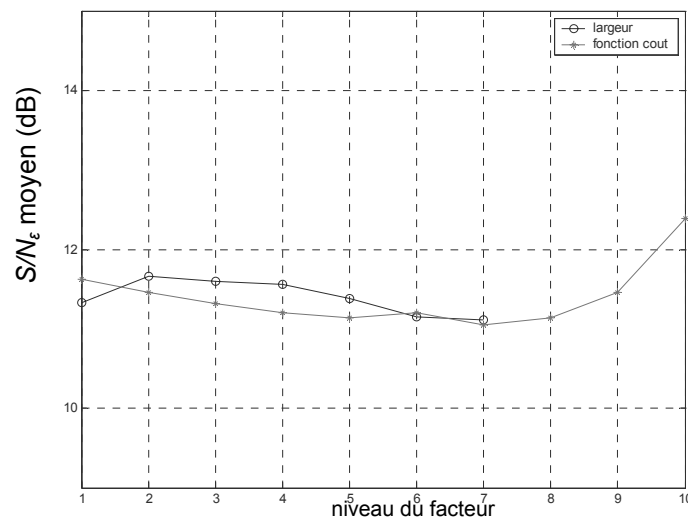


Figure 98. Effet moyen sur la robustesse.

Pour le réglage du seuil permettant de déterminer quand une dent est en prise, la Figure 98 suggère de prendre soit peu, soit beaucoup de données lorsque la dent est en prise. Prendre beaucoup de données, c'est-à-dire calculer la moyenne des efforts sur toute la durée où une dent est en prise dans la matière, peut nuire aux détections d'endommagement de l'outil lorsque le nombre de dents est important. Prenons l'exemple de la Figure 99, où un outil à 6 dents réalise une passe de rainurage. Si l'entité « moyenne dent en prise » est calculée sur 100% de l'engagement de la dent, cela revient à faire la moyenne des efforts sur un demi-tour de broche. Si la dent N°4 s'écaille, les entités extraites des 2 dents adjacentes (N°3 et 5) seront très affectées et les 2 suivantes (N°2 et 6) moyennement. Seule la dent opposée conservera un même niveau d'efforts. Ainsi, l'information selon laquelle une des dents est endommagée, va être diffusée parmi 5 des 6 dents. Il n'y aura pas de variations importantes de niveau entre les entités, et le bris risque de ne pas être détecté. Ainsi, pour que l'entité extraite soit discriminante pour détecter un endommagement lorsque plusieurs dents sont engagées simultanément, elle doit extraire l'information sur une zone restreinte.

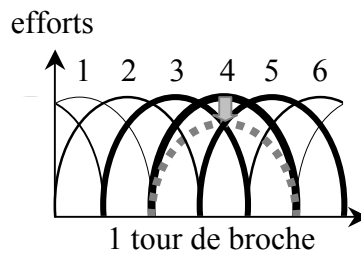


Figure 99. Problème des détections de bris quand plusieurs dents sont engagées simultanément.

Néanmoins, nous éviterons également d'extraire un pic (ou très peu de points) pour 2 raisons. Tout d'abord, les essais traités ici ont été réalisés sur le centre d'usinage Hermle et présentent moins de vibrations dans les signaux que ceux réalisés précédemment sur le Sabre. Or, nous avons vu au chapitre précédent que, sur cette machine, les pics n'étaient pas robustes, car des vibrations qui n'étaient pas synchrones avec la fréquence de passage des dents nuisaient à leur pertinence. L'entité « moyenne dent en prise » ne peut pas être calculée à partir des essais réalisés sur la machine Sabre (avec les problèmes d'asservissement de la broche, estimer la position angulaire de l'outil devient plus ardu). Nous pensons qu'en intégrant ces essais à notre calcul de robustesse, l'extraction d'un pic aurait été proscrite. Néanmoins, en prenant en compte davantage de points qu'un simple pic, l'entité extraite devrait être plus robuste dans le cas général. En outre, l'information sur la position angulaire de la broche est actuellement reconstruite. Elle repose essentiellement sur une estimation correcte de la fréquence réelle de rotation de la broche et sur une hypothèse quant à la qualité de l'asservissement de la broche. Une très faible erreur peut engendrer un déphasage de quelques degrés après une minute d'usinage. Le pic n'est alors plus extrait à la position correcte (à droite de la Figure 100). Par contre, en choisissant d'effectuer une moyenne sur un faible intervalle, le système devient plus tolérant. Nous fixerons donc le seuil à 10% de moins que la valeur du pic (à gauche de la Figure 100).

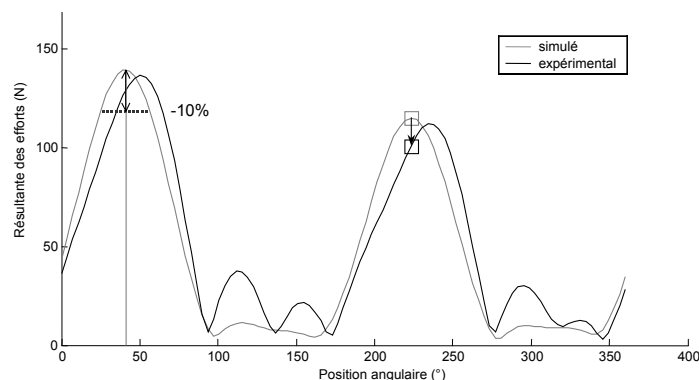


Figure 100. Risque de déphasage entre les efforts expérimentaux et simulés, selon l'estimation de la fréquence réelle de rotation de la broche.

Quant à la fonction coût de la boucle d'optimisation lors de l'étalonnage, la Figure 100 montre qu'il est préférable de ne pas prendre en compte les zones où les dents n'usinent pas. Nous écartons donc l'utilisation de la signature de l'outil sur un tour de broche, dans la fonction coût de l'étalonnage du modèle d'efforts. La Figure 98 nous suggère de choisir le 2^e niveau du facteur *fonction coût*, c'est-à-dire prendre le paramètre λ de l'équation 44 à 0 et ne prendre en compte que les écarts entre les entités extraites des signaux expérimentaux et simulés (et non leurs différences entre dents adjacentes).

On pourrait donc se demander pourquoi nous avons étudié l'influence de ce paramètre. Prendre un λ valant 25 améliore significativement la robustesse du système dans le cas d'une correction par ratio qui prend en compte la valeur de l'avance. Mais comme l'étude de robustesse a montré qu'il n'est pas nécessaire de corriger par rapport à l'avance, le paramètre λ de la fonction coût perd de son influence dans ce cas. D'où $\lambda = 0$.

Pour résumer, nous avons donc choisi de filtrer les signaux d'efforts à 1½ fois la fréquence de passage des dents et d'en extraire les entités « moyennes dent en prise » obtenues par un seuil réglé à 10%. Les estimations de battement radial sont ensuite corrigées par ajout, sans tenir compte de la vitesse d'avance. Enfin, la fonction coût de l'étalonnage minimise les écarts entre les entités extraites des signaux expérimentaux et simulés ($\lambda = 0$).

8.2. Seuils de détection de l'endommagement d'une dent

Nous venons de déterminer les réglages de notre système de S.U.I les plus pertinents, permettant d'effectuer une estimation robuste de l'état de l'outil. Que faire ensuite de ces estimations ?

Pour l'étude de robustesse, nous avons estimé le battement radial de dents neuves, pour des jeux de 70 conditions de coupe où 60 tours de broche ont été traités. Après correction de ces estimations (grâce à des simulations numériques), cette population de 4200 estimations de battement radial suit une loi Normale dont l'écart-type σ_e^{pop} a été calculé. Nous pouvons donc déterminer dans quel intervalle vont se situer les estimations, tant que l'outil n'est pas endommagé. A contrario, si des estimations se situent en dehors de cet intervalle, nous en déduirons qu'un incident est survenu.

Au cours de l'usinage d'une pièce, nous proposons donc de suivre les estimations de l'état de l'outil en les reportant sur une carte de contrôle, à l'image de ce qui est couramment utilisé en Maîtrise Statique de Procédé. Les mêmes règles qu'en MSP seront alors appliquées. Par exemple, une estimation en dehors des seuils ne sera pas suffisante pour déclencher une alarme.

Notre Surveillance d'Usinage étant Intermittente, des estimations en dehors des seuils sur une zone stable, seront attendues pour déclencher une réaction de notre système.

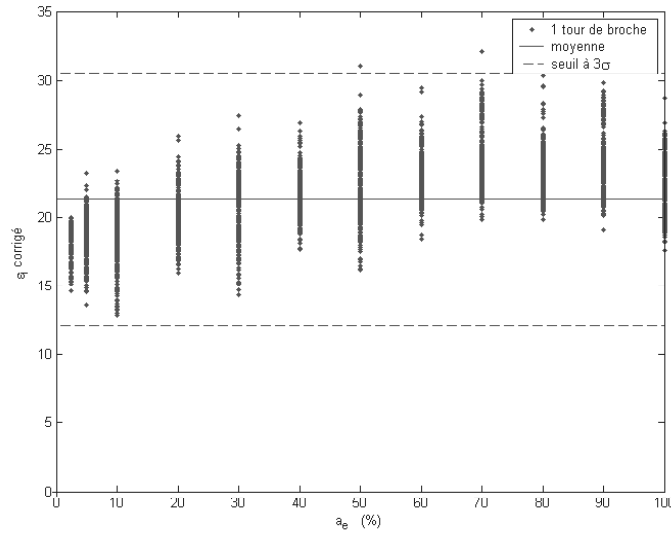


Figure 101. Carte de contrôle des estimations de l'état de l'outil.

Nous allons ainsi placer des seuils de détection de l'endommagement de l'outil (correspondant aux limites de contrôle de la MSP), de part et d'autre de l'intervalle où se situent les estimations de battement radial lorsque les dents sont neuves. Pillet [Pil99] préconise de toujours placer les seuils à ± 3 fois l'écart-type. Si la distribution suit une loi Normale, cela correspond à un risque α de 0,27%. Tous les 1000 tours de broche, 3 estimations seront donc probablement en dehors des seuils, à tort. Ce risque est tout à fait acceptable, d'autant plus du fait de l'intermittence de notre surveillance. En effet, elle permet de passer outre des pics soudain dans les efforts par exemple.

Nous allons maintenant voir comment nous avons résolu le problème de l'obtention de l'écart-type σ_{ϵ}^{pop} de la population des estimations de battement après correction (70 conditions de coupe, 60 tours de broche). En effet, il n'est acceptable industriellement de tester tous ces jeux de conditions de coupe avant de débiter l'usinage d'une pièce. Notre méthode nécessitant l'usinage de 4 passes d'étalonnage avant de débiter la surveillance de n'importe quel usinage, nous allons les utiliser pour estimer σ_{ϵ}^{pop} . Nous noterons cette estimation réalisée à partir des 4 passes d'étalonnage $\sigma_{\epsilon}^{étalon}$.

Par ailleurs, nous considérerons que σ_{ϵ}^{pop} est identique pour toutes les dents. Pour le calculer à partir des $\sigma_{\epsilon}^{pop_j}$ de plusieurs dents j , il faut faire la moyenne des variances pour ne pas biaiser le calcul (ce qui revient à calculer une moyenne quadratique à partir des écarts-types).

Pour chacun des 3 outils présentés au 8.1.2, le modèle d'effort a été étalonné à partir des 4 passes d'étalonnage. Ensuite, le battement radial a été estimé à partir des efforts mesurés lors de ces 4 passes (et pour un même nombre de tours de broche, égal à 60), puis corrigé à l'aide des simulations numériques. $\sigma_{\varepsilon}^{etalon_j}$ est alors calculé à partir de la population des estimations de battement radial corrigées de la dent j . La moyenne quadratique donne $\sigma_{\varepsilon}^{etalon}$. Le Tableau 14 a ainsi été obtenu. Il permet de comparer les écarts-types des populations d'estimations de battement radial réalisées à partir des passes d'étalonnage ou de toutes les passes.

Ecart-types des populations (μm)	par dent		par outil	
	$\sigma_{\varepsilon}^{etalon_j}$	$\sigma_{\varepsilon}^{pop_j}$	$\sigma_{\varepsilon}^{etalon}$	$\sigma_{\varepsilon}^{pop}$
2 dents (où $\varepsilon_2 = -22 \mu\text{m}$)	3,1	2,9	3,1	2,9
2 dents (où $\varepsilon_2 = -4 \mu\text{m}$)	2,2	2,5	2,2	2,5
3 dents (où $\varepsilon_2 = +9 \mu\text{m}$ et $\varepsilon_3 = -51 \mu\text{m}$)	2,8	4,8	4,6	5,3
	5,8	5,7		

Tableau 14. Ecart-types des populations d'estimations de battement radial.

Les écarts-types obtenus à partir des 4 passes d'étalonnages sont proches de ceux obtenus pour toutes les passes. Les seuils de détection de l'endommagement de l'outil seront donc désormais placés à $\pm 3 \sigma_{\varepsilon}^{etalon}$, par rapport à $\varepsilon_{j\text{sim}}$ qui est la valeur de battement simple identifiée lors de l'étalonnage et par rapport à laquelle les corrections sont effectuées.

8.3. Validation des améliorations apportées à la méthode de S.U.I.

Nous venons de définir une configuration robuste de notre système de Surveillance d'Usinage Intermittente et nous avons précisé comment les seuils de détection de bris sont placés. Nous avons également proposé des améliorations permettant au système de S.U.I. de s'adapter aux cas où certaines des dents ne participent pas à la coupe et au cas où plusieurs dents sont engagées simultanément dans la matière.

Nous allons maintenant tester si, dans un cas que nous n'avons jamais testé jusqu'ici, notre méthode permet de détecter avec fiabilité des endommagements de l'outil. Nous allons traiter les expérimentations réalisées avec l'outil à 5 dents. Plus le nombre de dents augmente, plus elles vont usiner simultanément et plus il sera difficile d'identifier qu'un incident est survenu.

20 passes rectilignes ont été usinées pour 10 engagements radiaux et 2 avances différentes, à la fois avec des plaquettes neuves puis avec une dent endommagée. Les 4 passes d'étalonnage (parmi les 20 réalisées avec l'outil neuf) permettent de corriger les estimations et de placer les seuils de détection. Le modèle d'efforts de coupe a été renseigné par $k_t = 199$ MPa, $p = -0,22$ et $\varepsilon_{j\text{ sim}}$ valant respectivement 0, -53, -86, -42 et +13 μm . Par rapport à ces valeurs de battement radial simple, les seuils de détection d'endommagement sont placés à $\pm 3 \sigma_e^{\text{étalon}}$ qui vaut ici 5,4 μm (respectivement 5 ; 7,4 ; 5 et 3,2 pour chaque battement radial simple estimé). La Figure 102 présente une comparaison des signatures d'efforts mesurés et simulés. Bien que, pour l'instant, le coefficient k_r du modèle d'effort soit fixé à 0,5, les efforts sont correctement simulés, même avec un outil à 5 dents.

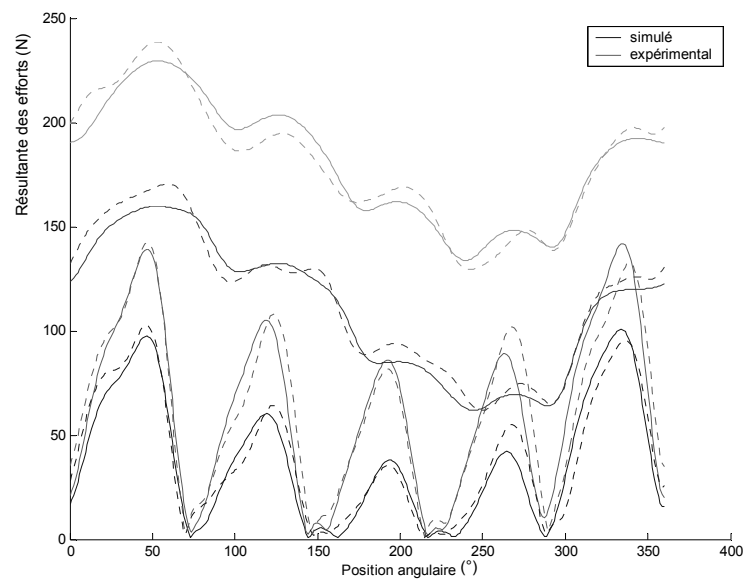


Figure 102. Signatures des efforts mesurés et simulés des 4 passes d'étalonnage.

La Figure 103 présente les résultats obtenus en appliquant l'ensemble de la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente. Les estimations de battement radial sont bien corrigées et se situent à l'intérieur des seuils de détection, quelles que soient les conditions de coupe. Pourtant, nous avons vu précédemment que la signature de l'outil sur un tour de broche (au niveau des efforts), peut changer du tout au tout pour un outil à 5 dents selon que l'engagement radial soit faible ou important. C'est grâce à la correction par simulations numériques et à l'entité « moyenne dent en prise » que de tels résultats sont possibles. L'état de l'outil est correctement estimé. Nous pouvons donc conclure que notre méthode a permis une détection fiable de l'état de l'outil, pour de nombreux jeux de conditions de coupe et pour un outil à 5 dents (dans le cas où il est neuf).

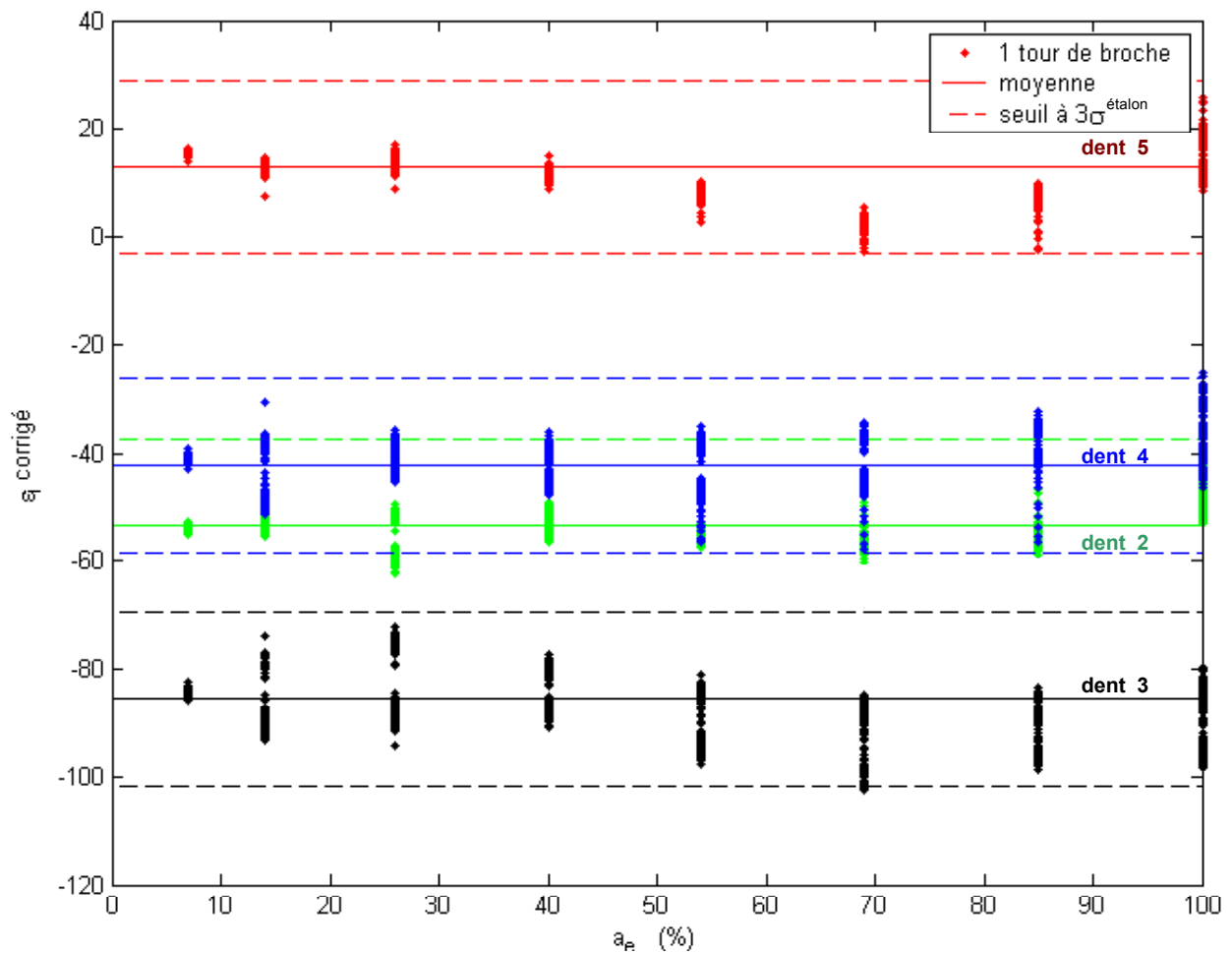


Figure 103. Estimations de battement radial, outil possédant 5 plaquettes neuves.

La 5^e dent a ensuite été endommagée volontairement par nos soins (Figure 104). Puis, des passes ont été usinées pour les mêmes jeux de conditions de coupe qu'avec l'outil lorsqu'il était encore neuf. L'étalonnage correspondant à l'outil neuf a été conservé et les estimations sont compensées de manière identique.

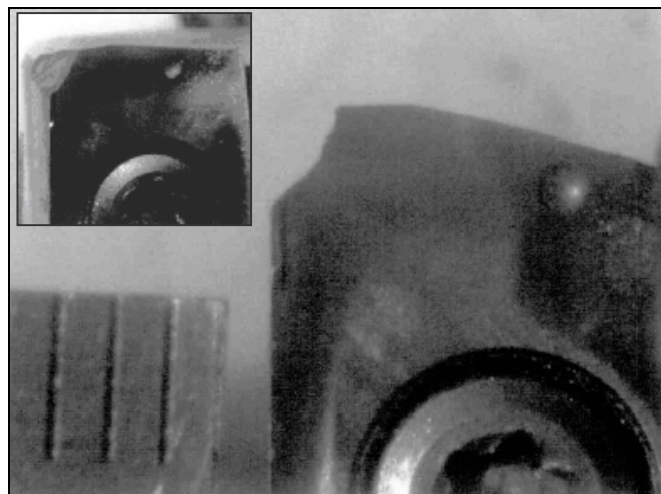


Figure 104. Endommagement de la dent N°5.

Suite à l'endommagement de la dent N°5, la signature de l'outil sur un tour de broche a changé, au niveau des efforts, comme nous pouvons le constater sur la Figure 105.

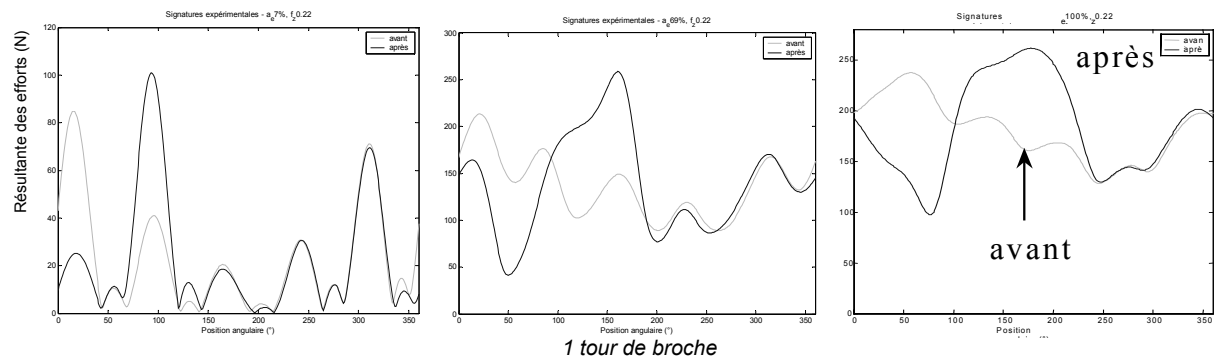


Figure 105. Signature de l'outil avant et après l'endommagement de la dent N°5, pour 3 engagements radiaux différents ($f_z = 0,22$ mm/dent et $a_e = 7, 69$ et 100% de gauche à droite).

La Figure 106 présente les estimations de battement radial obtenues. Toutes les estimations de battement de la dent N°5 (en rouge dans la Figure 106) correspondant à l'ensemble de tous les essais représentant 20 cas de conditions de coupe différentes sont en dehors des seuils. Le système de S.U.I. a donc détecté avec fiabilité qu'une des dents était endommagée, quelles que soient les conditions de coupe.

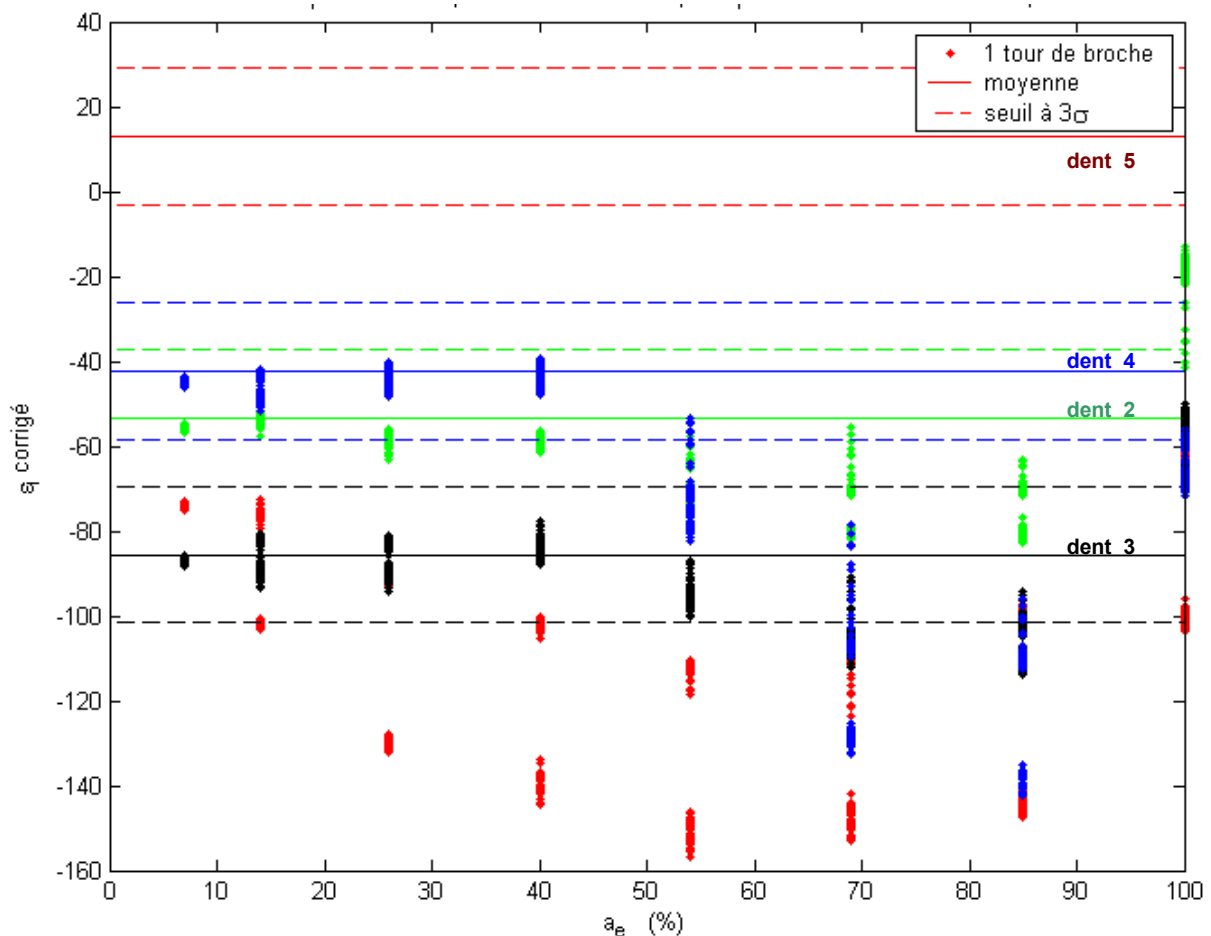


Figure 106. Estimations de battement radial, outil possédant 5 plaquettes dont une endommagée.

Ainsi, dans le cas défavorable et ardu d'un outil à 5 dents, nous avons montré que notre système de S.U.I. permet d'effectuer une surveillance d'usinage fiable. Seulement 4 passes d'étalonnage ont été nécessaires et l'opération d'ébauche de n'importe quelle pièce aurait ainsi pu être surveillée.

En appliquant à nouveau notre méthode à la pièce test définie au chapitre II, nous pouvons apprécier les améliorations apportées à notre méthode par le couplage entre simulations et expérimentations.

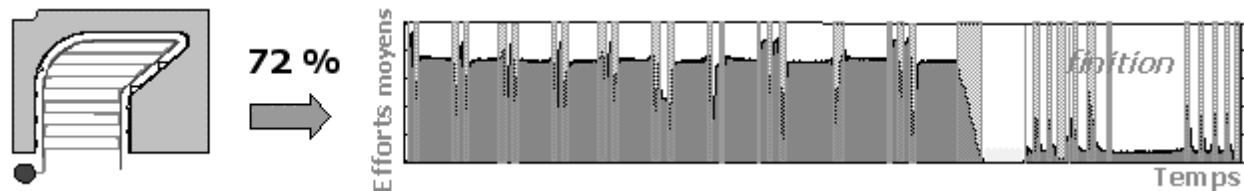


Figure 107. Application de la SUI (après perfectionnement) à la pièce test.

A présent, l'état de l'outil peut être surveillé au cours de l'usinage de la passe de finition. Ainsi, l'usinage de la pièce peut être surveillé pendant 20% de plus qu'au chapitre précédent, soit 72% du temps.

9. Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons montré comment nous pouvons compenser les variations des estimations de battement radial, afin de pouvoir estimer l'état de l'outil de manière plus robuste et plus précise. Pour corriger ces estimations, un simulateur d'efforts a été développé. Basé sur un modèle de coupe non-linéaire, il permet de mieux prédire l'effet du battement radial des dents sur les efforts, par rapport au modèle de coupe linéaire sur lequel les estimations de battement sont basées. Néanmoins le calcul de ces estimations est simple et rapide ; il est donc favorable à une application en temps réel. Le critère a donc été conservé et les variations de ses estimations sont compensées en ligne grâce aux simulations numériques effectuées avant l'usinage.

La définition du critère a été généralisée et permet maintenant de traiter les cas où certaines des dents ne participent pas à la coupe, ainsi que les cas où plusieurs dents sont engagées simultanément dans la matière. La méthode permet désormais de surveiller des usinages réalisés avec des outils de plus de 3 dents, quelles que soient les conditions de coupe.

Des améliorations ont été apportées à chaque élément composant le système de S.U.I.. Notamment, nous avons proposé d'extraire des signaux, des entités plus robustes que les pics

d'efforts. Avec l'entité « moyenne dent en prise », seule l'information pertinente quant au travail réalisé par une dent est extraite des signaux.

Grâce à des indicateurs de qualité, nous avons alors pu déterminer la configuration de notre système de S.U.I. la plus robuste. La fréquence de coupure du filtre passe-bas doit être placée à 1½ fois la fréquence de passage des dents. L'entité « moyenne dent en prise » (calculée avec un seuil à 10%) est alors extraite et permet d'estimer le battement radial des dents. Ce dernier est ensuite corrigé par l'ajout d'un terme obtenu par simulations numériques. Nous avons montré qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte les variations de l'avance au cours de l'usinage, pour effectuer les corrections. Ce résultat est très intéressant car il simplifiera la mise en œuvre de notre système de S.U.I.

Ensuite, pour suivre l'évolution de l'état de l'outil au cours de l'usinage, des seuils de détection d'endommagement de l'outil sont placés de la valeur de battement radial identifié lors de l'étalonnage. Ces seuils sont placés à $\pm 3 \sigma_{\epsilon}^{\text{étalon}}$; où $\sigma_{\epsilon}^{\text{étalon}}$ est l'écart-type de la population des estimations de battement radial après correction, calculées à partir des 4 passes d'étalonnage. Une carte de contrôle est alors obtenue, à l'image des travaux réalisés en MSP.

Afin de valider les améliorations apportées à notre méthode, nous l'avons appliquée à des passes réalisées sur un jeu important de conditions de coupe, avec un outil neuf puis avec une des dents endommagée. L'outil possédant 5 dents, l'exercice était plus difficile et non réalisable auparavant. Néanmoins, l'état de l'outil a été estimé avec une grande fiabilité, qu'il soit endommagé ou non. Les améliorations ont donc permis des avancées significatives quant aux opérations d'usinage d'ébauche pouvant être surveillées avec robustesse et fiabilité. Les limitations en terme de gamme de conditions de coupe et nombre de dents de l'outil, évoquées au chapitre précédent, ont ainsi été levées.

La méthode proposée semble donc particulièrement pertinente pour effectuer une surveillance fiable et robuste de productions flexibles. Grâce aux simulations numériques notamment, le domaine de validité a été très largement étendu et la méthode peut maintenant surveiller avec fiabilité une grande diversité de configurations d'usinage, même si l'outil comporte un nombre important de dents. La méthode repose maintenant sur bien plus qu'un simple principe d'intermittence. C'est pourquoi dorénavant le sigle SUI signifiera Surveillance d'Usinage Intelligente (ou SIM, pour Smart In-process Monitoring).

Nous avons validé notre méthode en provoquant des bris de plaquette hors-usinage. Nous devons maintenant valider si elle permet bien de détecter des endommagements de l'outil au cours de l'usinage. Par la même occasion, nous verrons comment nous pouvons mettre en place notre système de Surveillance d'Usinage Intelligent, et comment il s'intégrerait dans un système de production flexible.

Chapitre V : Application et intégrations dans un système de Surveillance d'Usinage

Au chapitre précédent, des avancées significatives ont été apportées à notre méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente. L'état de l'outil est maintenant estimé d'une manière plus robuste et plus précise. Notamment, des simulations numériques (réalisées avant l'usinage) permettent de corriger les estimations de l'état de l'outil qui sont réalisées au cours de l'usinage. Il est maintenant possible de surveiller des outils possédant davantage de dents, sur un domaine de conditions de coupe qui n'est plus limité. Ces améliorations ont été validées par la fiabilité des estimations de l'état d'un outil à 5 dents, ayant ou non une dent endommagée. Le bris de plaquette ayant été réalisé hors-usinage, nous devons maintenant tester si notre méthode est capable de détecter des incidents survenant au cours de l'usinage d'une pièce.

Dans ce chapitre, nous allons prendre un cas d'étude que nous traiterons entièrement. Il s'agit de l'usinage par balayage d'une poche ouverte à l'aide d'une fraise cylindrique possédant 3 dents. Au cours de l'usinage, un incident sera provoqué. Nous allons ainsi voir comment notre méthode peut être mise en place dans un cas concret. 4 passes d'étalonnage seront réalisées au préalable. Elles permettront d'effectuer des simulations d'efforts pour l'ensemble des conditions de coupe allant être rencontrées au cours de l'usinage de la pièce. Ainsi, les estimations de l'état de l'outil pourront être corrigées au cours de l'usinage. Lors de la réalisation de la pièce, nous provoquerons l'endommagement d'une des dents de l'outil.

Nous proposons de coupler notre système de S.U. en ligne, à un moyen d'inspection de l'outil hors-usinage. Si le système détecte une dégradation de l'état de l'outil par l'analyse des signaux d'efforts, l'usinage est alors stoppé pour analyser l'état de l'outil. Ce contrôle confirmera ou non qu'un incident est survenu. La fiabilité du système de S.U. sera alors encore accrue et des

détections abusives seront évitées. L'ensemble SUI et le système d'inspection d'outils forment un système complet de surveillance d'usinage combinant la surveillance indirecte pendant l'usinage de l'outil et une analyse de l'état de l'outil hors usinage. Cette dernière est demandée soit à partir d'évènements détectés par le SUI ou soit par le pilotage du process en général (comme une inspection de vérification de l'outil avant un usinage de pièce à forte valeur ajoutée). Le tout offre donc de nombreuses combinaisons possibles. Nous nommerons ce nouveau système *SUIMO*, pour Surveillance d'Usinage Intelligente et Mesure d'Outil (ou *SIMTI* en anglais – Smart In-Process Monitoring and Tool Inspection)

Une fois la démarche appliquée et validée, nous nous intéresserons à d'autres types d'endommagement de l'outil, tels que les phénomènes d'usure. Nous étudierons si l'usure ne va pas perturber nos estimations de battement radial, du fait du recul des arêtes de coupe, et nuire à la fiabilité de notre système de S.U.I..

Nous porterons ensuite notre attention sur le choix d'un capteur pouvant avantageusement remplacer la table dynamométrique et être utilisé pour effectuer la S.U. en ligne.

Enfin, nous verrons dans quel cadre notre système de S.U.I. peut s'intégrer dans un système de surveillance de l'usinage plus général.

1. Mise en place de la Surveillance d'Usinage Intelligente

Nous allons voir comment le système *SUIMO* que nous avons proposé peut s'intégrer dans le cadre d'un système de production, réalisant par exemple des pièces en petite série. La méthode comporte 3 étapes : la préparation de la S.U.I, sa réalisation au cours de l'usinage et enfin la confirmation de la détection en ligne d'incident par un système d'inspection de l'outil hors-usinage.

1.1. Préparation de la Surveillance d'Usinage Intelligente

1.1.1. Etalonnage

Nous avons vu que notre système a besoin d'informations quant au couple outil/matière. Les efforts de coupe sont mesurés au cours de l'usinage de 4 passes d'étalonnage réalisées avec l'outil, dans le même matériau que la pièce (éventuellement sur une zone de la pièce qui doit être usinée par la suite. La Figure 108 présente le dispositif expérimental et le Tableau 15 précise les conditions opératoires.

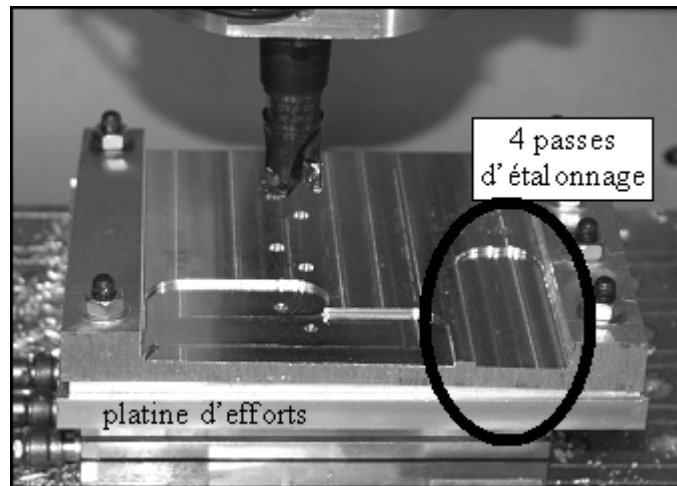


Figure 108. Dispositif expérimental.

Paramètre	Valeur
2 avances à la dent	0,08 et 0,15 mm/dent
2 engagements radiaux	30 et 100 % diamètre outil (en opposition)
Outil	Fraise cylindrique Ø 25 mm à 3 plaquettes (SECO, non-revêtues, nuance H15)
Vitesse de coupe	600 m/min
Engagement axial	2 mm
Matière	Alliage d'aluminium 2017
Machine outil	Hermle C 800 U
Commande Numérique	Heidenheim TNC 430
Fréq. échantillonnage	20 kHz

Tableau 15. Paramètres opératoires des passes d'étalonnage.

La chaîne de conditionnement des signaux d'efforts présentée au chapitre précédent est appliquée ; à savoir recherche de la fréquence réelle de rotation de la broche, synchronisation des signaux (nombre entier de points par tours de broche), filtrage à $1\frac{1}{2}f_c$ et calcul de la résultante. L'étalonnage a ensuite identifié les constantes du couple outil matière : $k_t = 1050$ MPa, $p = -0,29$ et les battements radiaux $\varepsilon_{1\text{ sim}} = 0$, $\varepsilon_{2\text{ sim}} = +10$, $\varepsilon_{3\text{ sim}} = -43$ μm pour les simulations numériques ; et $K_c = 1300$ MPa pour les estimations de battement par le critère. Enfin, en corrigeant les estimations de battement à partir des signaux mesurés lors des passes d'étalonnage, l'écart-type de la population de ces estimations $\sigma_e^{\text{étalon}}$ est évalué à 5,6 μm . Il nous permet de placer les seuils de détection d'endommagement de l'outil à $\pm 16,8$ μm de part et d'autre des valeurs de battement radial que nous venons d'identifier.

L'état initial de l'outil est également scanné par notre système d'inspection hors-usinage.

Un capteur optique spécifique est utilisé mais la confidentialité associée à ce développement ne permet pas de donner d'autres caractéristiques de l'appareillage. Une application a été développée dans le cadre du projet UGV Alu/Composites par Peigné, Laporte et Furet afin d'effectuer une qualification des outils coupants [UGV06].

Nous avons développé ici une autre application afin de répondre à nos besoins, qui sont spécifiquement liés à la surveillance d'usinage. Le capteur est placé dans la machine afin de pouvoir scanner l'outil monté en broche. Cela permet de quantifier les défauts de battement de l'ensemble du système en rotation {axe de broche + corps d'outil + plaquettes}.

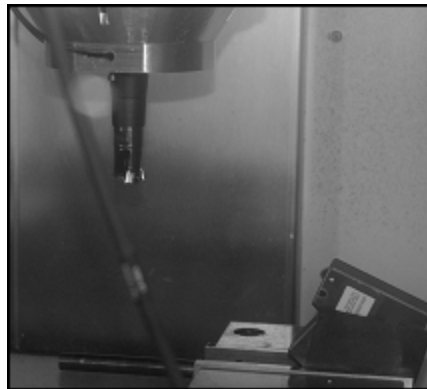


Figure 109. Système d'inspection des outils hors-usinage.

Notons que seule la moitié inférieure des plaquettes de l'outil est scannée, car l'engagement axial est de 2 mm au cours de ces essais. Ensuite, une reconstruction géométrique en 3D de l'outil est effectuée à partir des mesures et la Figure 110 est obtenue.

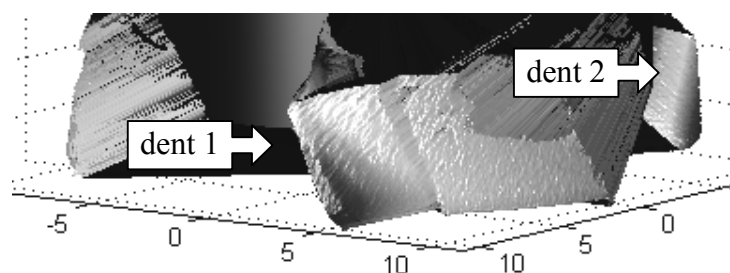


Figure 110. Reconstruction géométrique en 3D de l'outil, après inspection.

Chaque arête de coupe est alors extraite et permet de connaître la position des dents les unes par rapport aux autres et surtout leur battement. La précision est de l'ordre de 0,02 mm mais nous pouvons constater que le battement de la dent N°3 est plus faible. Ceci confirme ce que nous avons identifié à partir des mesures des efforts, lors de l'étalonnage.

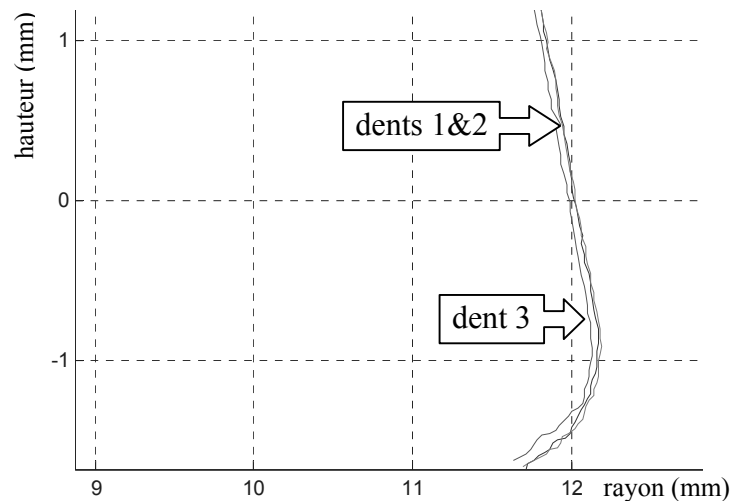


Figure 111. Battement radial obtenu par l'inspection de l'outil.

Ainsi, nous connaissons à présent l'état initial de l'outil qui va être utilisé lors de l'usinage de la poche.

1.1.2. Analyse du programme ISO

L'objectif est ici de déterminer l'ensemble des jeux de conditions de coupe que va rencontrer l'outil au cours de l'usinage de la pièce. Cela permettra de simuler les efforts pour ces différents jeux de conditions de coupe et, à terme, de corriger les estimations de battement radial réalisées au cours de l'usinage. Rappelons que seul l'engagement axial et radial de l'outil est pris en compte lors de correction. Ces 2 données peuvent aisément être calculées à partir du programme ISO, si la géométrie de la pièce brute est connue. S'il avait fallu connaître les variations d'avance également pour corriger, cette étape eut été plus complexe.

Il est expliqué au chapitre II comment calculer l'engagement de l'outil à partir des mesures de codeurs d'axes, la technique peut être utilisée ici.

Dans l'optique de la mise en œuvre du système de Surveillance d'Usinage, il est envisagé d'ajouter des instructions dans le programme ISO. Par l'activation d'une sortie de la CN, elles permettront de synchroniser la surveillance avec l'usinage en cours et notamment de connaître quelle correction appliquer aux estimations de battement à chaque instant.

1.1.3. Simulations numériques

Le modèle d'effort étant renseigné et les conditions d'engagement de l'outil au cours de l'usinage étant connues, nous pouvons maintenant simuler les efforts pour chaque jeu de conditions de coupe. Nous déterminons alors les intervalles où les entités « moyenne dent en prise » sont extraites. Les estimations de battement radial simulées sont alors obtenues à partir du

niveau théorique des entités. Elles permettront de corriger les estimations réalisées au cours de l'usinage.

1.2. Surveillance d'Usinage Intelligente au cours de l'usinage

Nous sommes maintenant prêts pour lancer l'usinage. Il s'agit des passes indiquées sur le graphe de gauche de la Figure 112. L'avance est de 0,15 mm/dent. La première passe (*a* flèche noire) est réalisée vers la droite de la pièce, avec un engagement radial de 44%. Un premier virage à 90° est franchi puis l'outil pénètre dans la matière et a_e atteint 100% (*b*). Après le 2^e virage, l'engagement est de 76%. Au milieu de cette dernière passe (entre *c* et *d*), nous avons placé un insert en acier trempé (65 HRC) au fond d'un trou et l'usinage est stoppé 2 cm plus loin. En plaçant cet insert, nous comptons provoquer l'endommagement d'une dent de l'outil (graphe de droite, Figure 112).

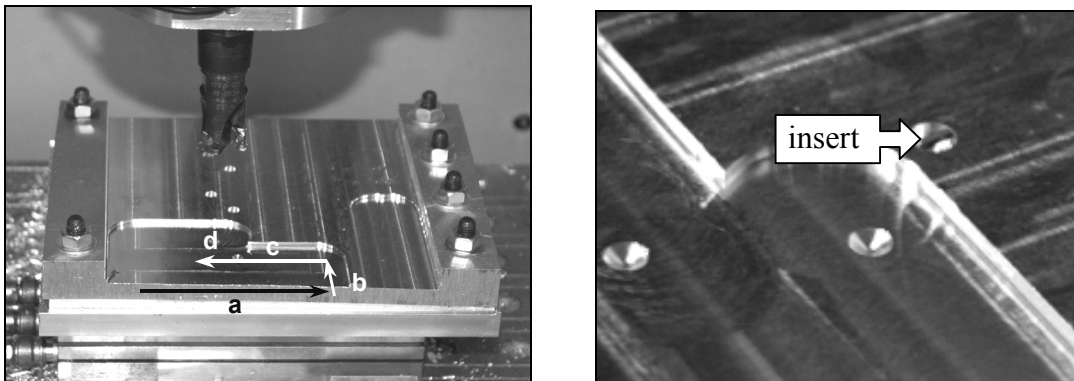


Figure 112. Insert placé sur la trajectoire de l'outil afin de provoquer un bris (entre *c* et *d*).

Lors de l'usinage, les efforts sont mesurés et le conditionnement des signaux est ensuite appliqué. Notons qu'une information provenant de la CN signifiant le changement de bloc dans le programme ISO, pourrait permettre au système de S.U.I. de synchroniser ses informations calculées lors de la préparation de la S.U. Cela permet par exemple de connaître la direction d'avance de l'outil et de compenser ainsi les déphasages introduits dans les efforts par les changements de direction (si l'outil vire de 90° à gauche, le pic généré par une dent aura lieu $\frac{1}{4}$ de période de rotation de la broche avant). Après synchronisation et correction des changements de direction de l'outil, les signatures d'outil en efforts de la Figure 113 sont obtenues, tour de broche après tour de broche. L'outil usine tout d'abord en opposition (*a*) puis nous avons le premier virage, pendant lequel les efforts sont quasiment nuls à cause de la chute d'avance. Ensuite, l'outil est totalement engagé lors de la passe de liaison (*b*). Suite au 2^e virage, on voit bien que l'outil usine en avalant (*c*). Les efforts chutent ensuite au franchissement du perçage et la dent N°1 semble usiner légèrement davantage ensuite (*d*).

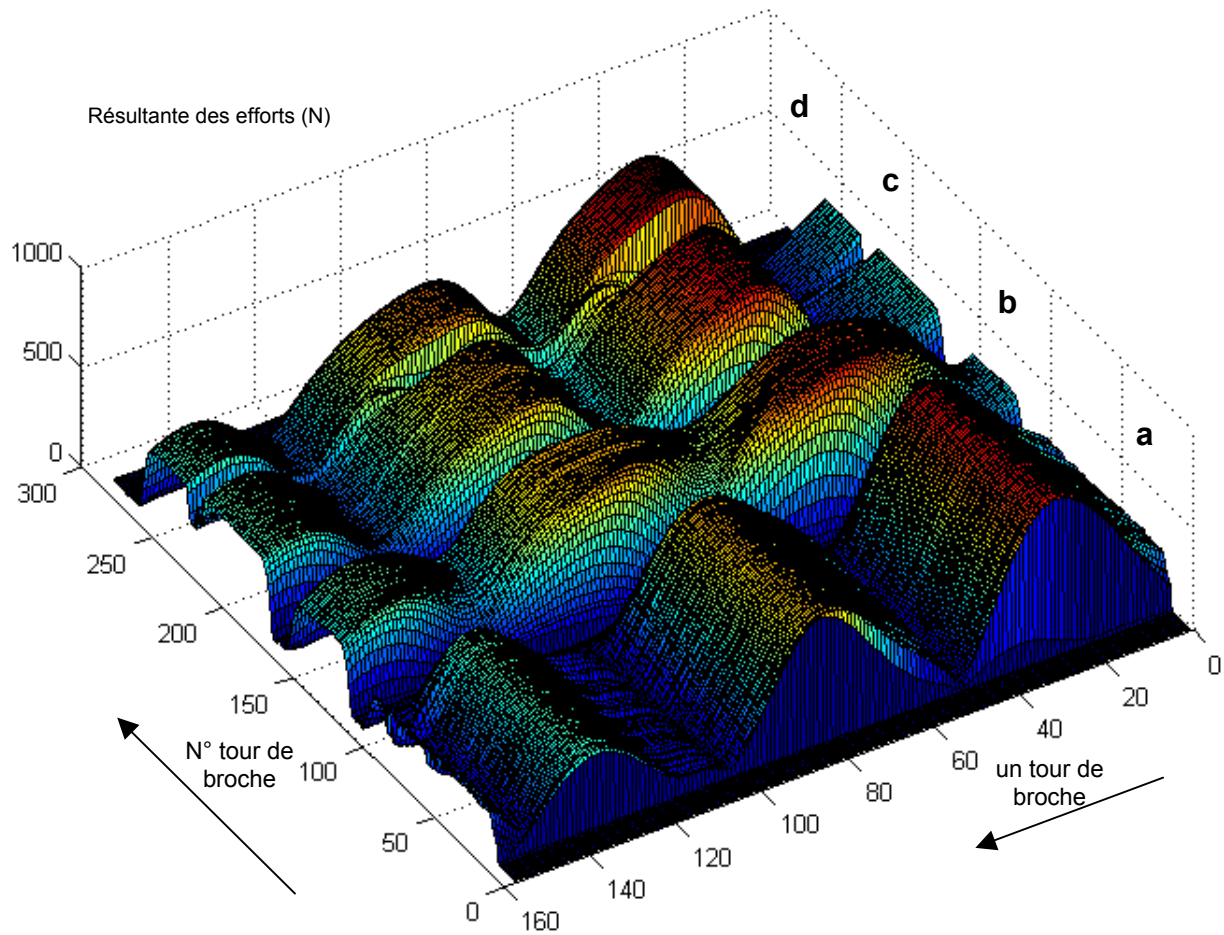


Figure 113. Evolution de la signature de l'outil sur les efforts au cours de l'usinage.

A partir des efforts moyens et par seuillage, le système détermine si l'outil est train d'usiner. Si c'est le cas, l'entité « moyenne dent en prise » est alors calculée à chaque passage de dents, Figure 114. On constate également une augmentation des efforts au niveau de la dent N°1.

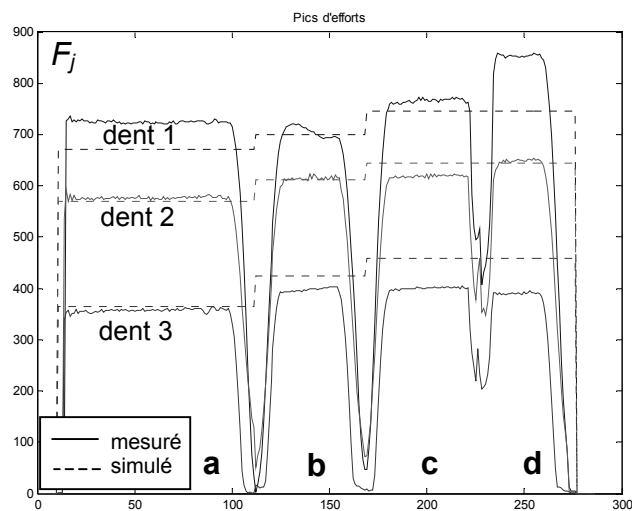


Figure 114. Entités « moyenne dent en prise » calculées au cours de l'usinage.

Précisons que l'annexe de ce chapitre explique le déroulement de l'incident, en détaillant toutes les signatures des efforts sur un tour de broche qui concernent le franchissement du trou.

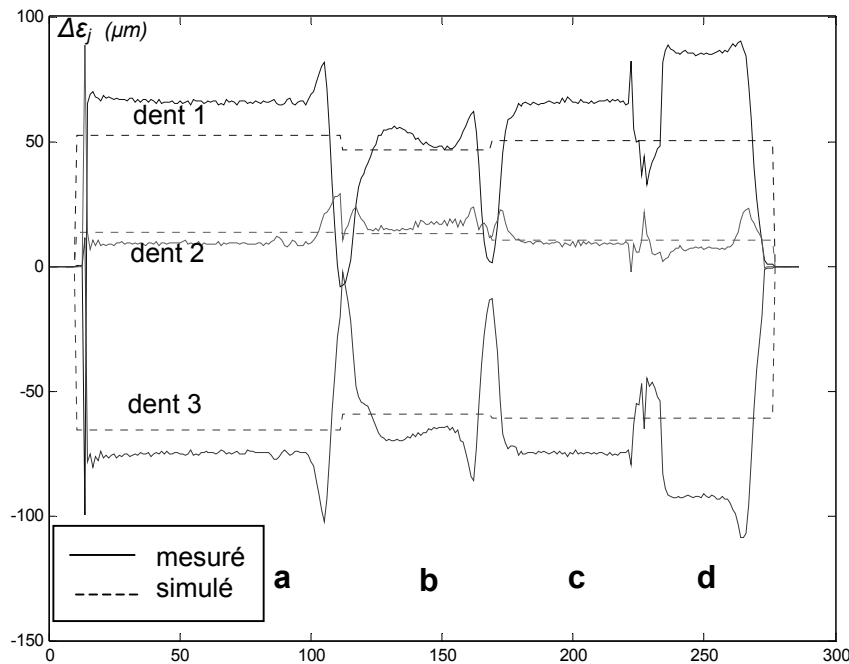


Figure 115. Evolution des estimations de battement radial relatif, au cours de l'usinage.

En appliquant le critère aux entités « moyenne dent en prise » calculées à chaque tour de broche, au cours de l'usinage, les estimations de battement radial relatif présentées Figure 115 sont obtenues. Les estimations de battement radial simple en sont ensuite déduites, en prenant pour référence la dent 1 ($\varepsilon_1=0$). Les valeurs sont alors corrigées ; par rapport aux valeurs de battement simple obtenues par simulation numérique (ces dernières sont déduites des courbes en pointillés ci-dessus en fixant $\varepsilon_1=0$). Ce sont ces estimations corrigées de battement radial simple qui sont reportées sur les cartes de contrôle de l'état de l'outil. Ensuite, lorsque la coupe est stable, le système établit un diagnostic quant à l'état de l'outil, comme nous allons le voir maintenant.

Si l'outil usine et que la coupe est stable (comme définit page 141), le système compare alors les estimations de battement radial corrigées aux seuils de détection afin de déterminer si un endommagement de l'outil a eu lieu. La Figure 116 présente les estimations corrigées de l'état de l'outil, au cours de l'usinage. Les traits continus représentent les valeurs de battement $\varepsilon_{j\text{sim}}$ identifiées lors de l'étalonnage et les seuils de détection en pointillés ont été placés de part et d'autre à $\pm 3 \sigma_{\varepsilon}^{\text{étalon}}$ (valeurs obtenues au §1.1.1). Les zones grisées signifient que l'usinage n'est pas stable et que la surveillance est suspendue.

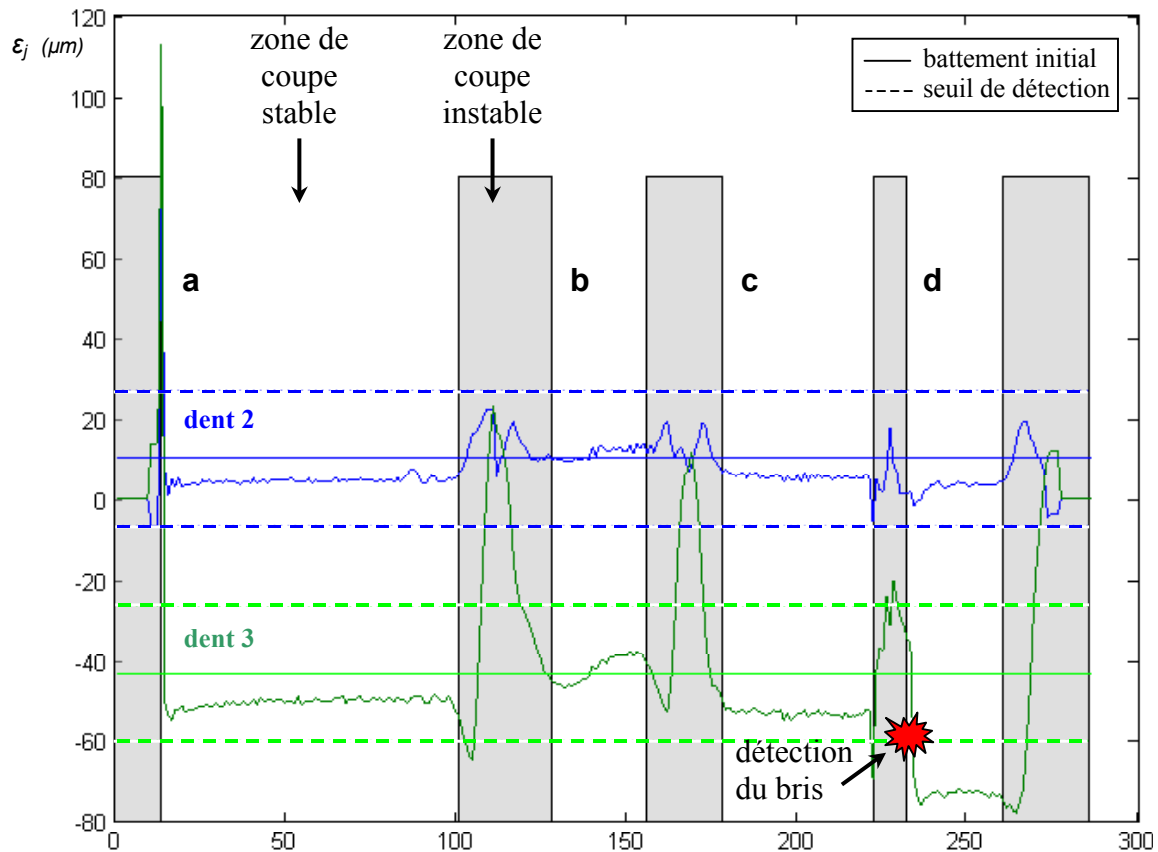


Figure 116. Carte de contrôle de l'état de l'outil, au cours de l'usinage.

On constate que les estimations de battement de la dent N°2 (en bleu) restent à l'intérieur des seuils tout au long de l'usinage. Cette dent n'a donc pas été endommagée. Par contre, les estimations de l'état de la dent N°3 (en vert) franchissent les seuils de détection après le perçage. Cela signifie que la dent a été endommagée. Le système de Surveillance d'Usinage Intelligent a immédiatement détecté l'incident et il va stopper l'usinage.

Mais avant de déclencher une alarme, l'outil va être scanné à nouveau afin de confirmer qu'une dent a bien été endommagée.

On peut noter que, sur les zones de coupe instables, certaines estimations franchissent les seuils. Néanmoins, grâce au principe d'intermittence de la méthode SUI, il n'en résulte aucune détection abusive. Seul l'endommagement réel d'une des dents, qui a été aussitôt détecté, est notifié. Cela montre la fiabilité de la méthode [Rit07a].

1.3. Inspection de l'outil hors-usinage

Suite à la détection de bris au cours de l'usinage, le système de Surveillance d'Usinage Intelligent arrête l'usinage pour venir scanner à nouveau l'outil. Après reconstruction géométrique de l'outil, les modèles sont recalés, ce qui permet une comparaison points par points de l'outil. La Figure 117 présente la mesure de l'outil réalisée après l'usinage. La carte de couleur affiche les écarts obtenus en retranchant aux dimensions initiales de l'outil, celles obtenues après l'usinage. Il semble donc manquer de la matière sur la dent N°3.

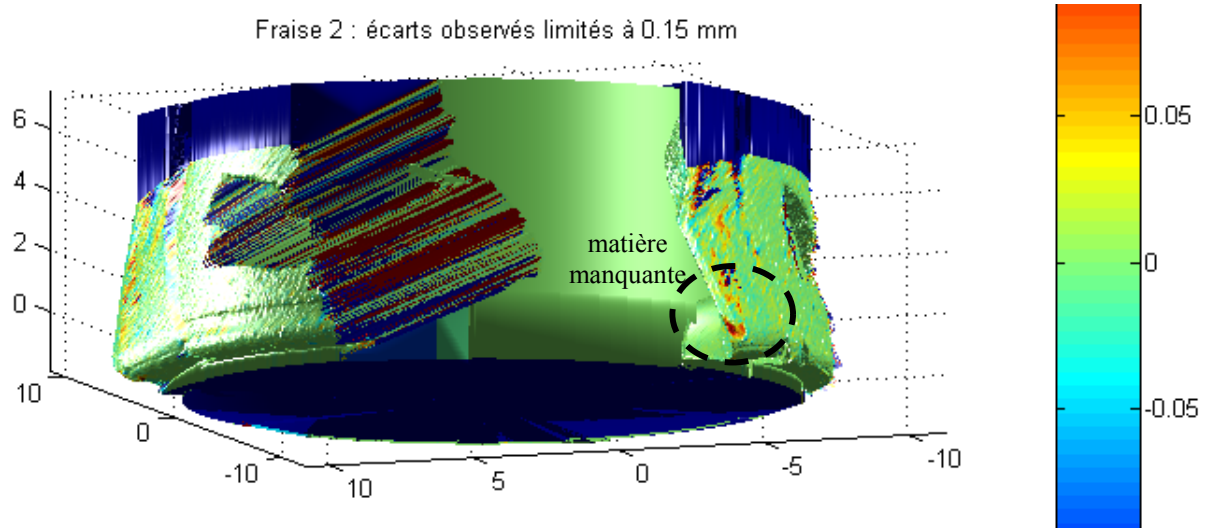


Figure 117. Comparaison de l'outil avant et après usinage.

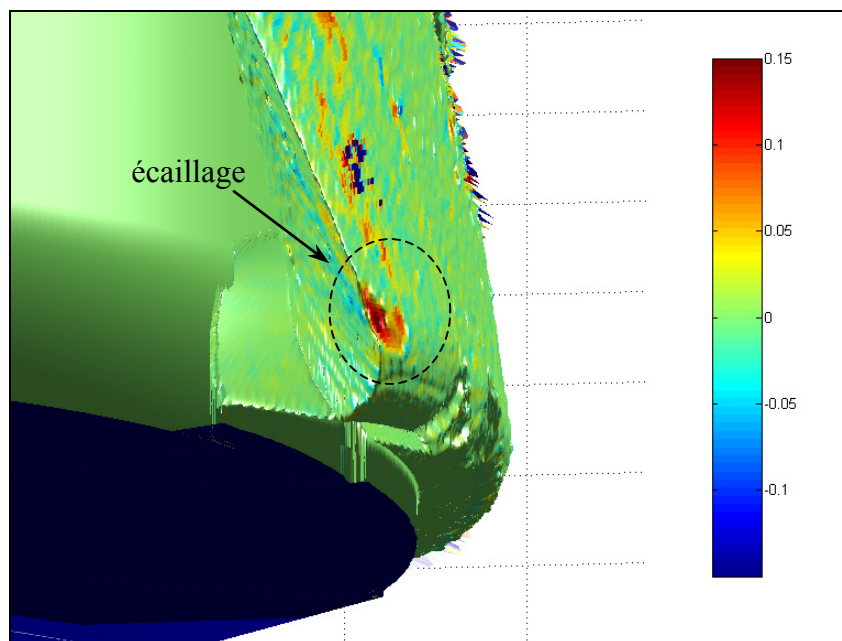


Figure 118. Confirmation visuelle de l'écaillage de la dent N°3.

Nous allons maintenant extraire le battement radial des dents de la fraise et le comparer à celui que nous avons obtenu initialement (§1.1.1), Figure 119.

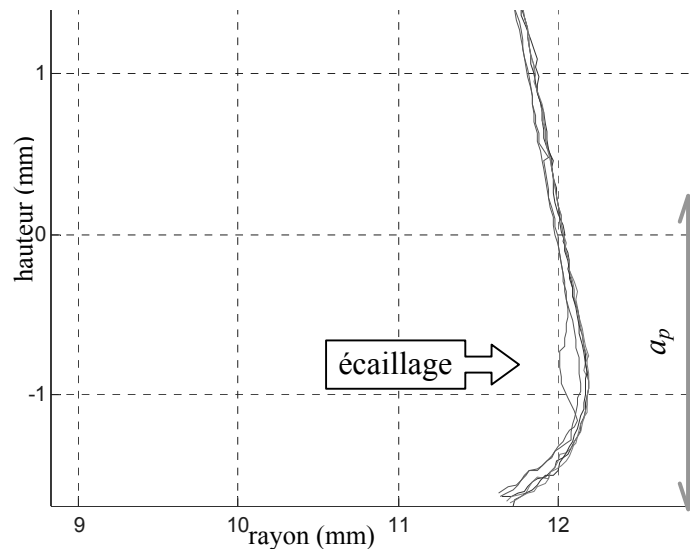


Figure 119. Comparaison des battements radiaux avant et après l'incident.

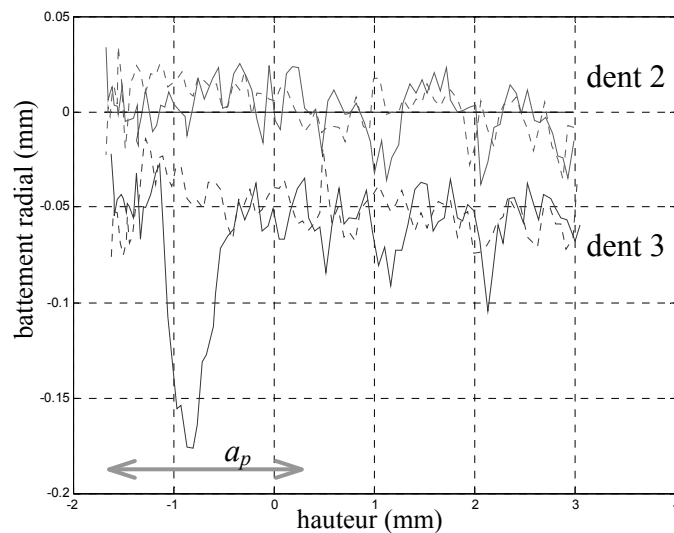


Figure 120. Constatation de l'endommagement de la dent N°3 par les variations du battement radial simple.

La Figure 120 nous montre, en ordonnée, que l'écaillage est profond de 0,1 mm environ. En prenant en compte le battement radial relatif, l'épaisseur nominale de copeau enlevée par la dent N°3 est normalement de $f_z + \Delta \varepsilon_3 = 0,15 - 0,043 + 0,01 = 0,117$ mm. Cela signifie que, sur la hauteur de l'écaillage (0,5 mm environ soit $\frac{1}{4}$ de a_p , cf. abscisse Figure 120), la dent N°3 n'usine presque plus et la dent N°1 doit donc enlever une épaisseur supplémentaire, ce qui pourrait la surcharger localement.

Notre système *SUIMO* s'avère donc très précis car, à la fois par l'analyse des signaux d'efforts et par une inspection de l'outil, il a détecté un endommagement léger, mais néanmoins préjudiciable, de l'une des dents.

2. Phénomène d'usure

Nous venons de voir que notre système de Surveillance d'Usinage Intelligente permet de détecter de très faibles écaillages de dent au cours de l'usinage. Notre méthode se comporte donc bien vis-à-vis d'incidents soudains : d'une part, l'intermittence de la surveillance et l'utilisation d'une carte de contrôle écartent les incidents bénins de type recyclage de copeaux ; et d'autre part, l'état de l'outil est correctement estimé sur les zones stables, ce qui permet de détecter des bris ou des écaillages de dent avec fiabilité. Nous allons maintenant étudier comment se comporte notre critère vis-à-vis d'événements plus progressifs tels que les phénomènes d'usure. En effet, au mieux notre critère permet de suivre l'usure des dents et, au pire, l'usure fait évoluer le battement radial des dents (recul des arêtes de coupe) au point de nuire aux estimations de l'état de l'outil.

Pour répondre à ces questions, nous allons traiter avec notre méthode de S.U.I., des essais d'usure réalisés par Garnier [Gar00] pour son doctorat. Il s'agit d'un plan complet de passes rectilignes et dont les 2 facteurs sont l'avance et l'usure des dents. Les paramètres opératoires sont précisés dans le Tableau 16.

Paramètre	Valeur
8 avances à la dent	0.0375, 0.075, 0.1125, 0.15, 0.1875, 0.225, 0.2625, 0.3 mm /dent
12 niveaux d'usure en Vb	0.06, 0.08, 0.09, 0.11, 0.12, 0.14, 0.17, 0.18, 0.21, 0.29, 0.32, 0.43 mm
Engagement radial	100 % du diamètre de l'outil
Engagement axial	3 mm
Vitesse de coupe	120 m/min
Outil	Fraise cylindrique de diamètre 32 mm avec 3 plaquettes (battements radiaux simples de 0 ; -16 ; -13,5 μ m)
Matière	Acier C48
Machine outil	Hermle C 800 U
Commande Numérique	Heidenhain TNC 430
Fréq. échantillonnage	12,5 kHz

Tableau 16. Paramètres opératoires des essais d'usure, réalisés par Garnier [Gar00].

A chaque niveau d'usure, S. Garnier a mesuré l'usure en dépouille Vb de chacune des dents à l'aide d'une binoculaire. Les données dans le Tableau 16 sont les moyennes des usures des dents.

En effet, malgré le battement radial des dents qui fait que certaines dents vont usiner davantage que d'autre, l'usure évolue de la même façon sur chacune des dents (Figure 121).

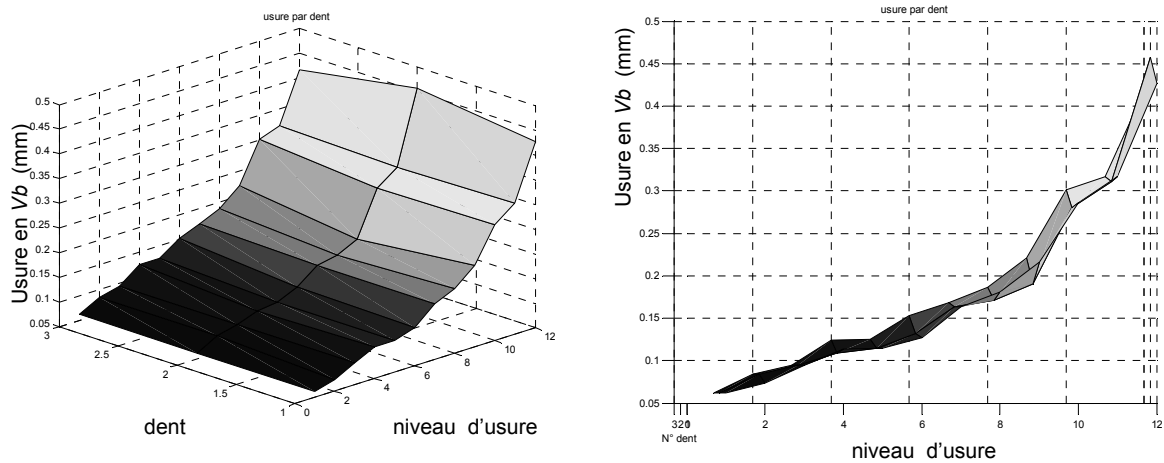


Figure 121. Evolution du niveau d'usure en V_b mesuré sur les 3 dents, au cours des essais.

La puissance consommée par la broche a également été mesurée au cours de la série d'essais. Nous pouvons observer sur la Figure 122 une légère augmentation des niveaux moyens d'efforts et de puissance, en fonction de l'usure. Détecter ces variations de manière robuste, afin d'estimer l'usure des dents, semble difficilement réalisable à partir des valeurs moyennes (sur un tour de broche) des capteurs.

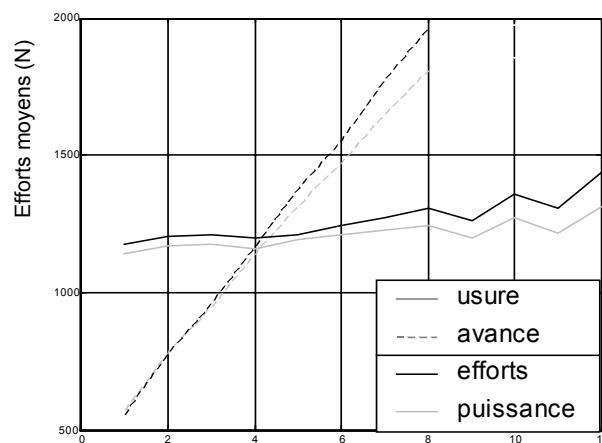


Figure 122. Effets moyens de l'avance et de l'usure sur les signaux d'efforts moyens et de puissance.

Notre méthode de S.U.I. extrait une information plus spécifique des signaux. Voyons si elle est sensible à l'usure ou non. Pour cela, nous avons appliqué notre méthode de S.U.I. aux signaux

d'efforts mesurés lors des essais. Suite au conditionnement des signaux, les entités sont extraites à chaque passage de dent. Les résultats sont présentés Figure 123.

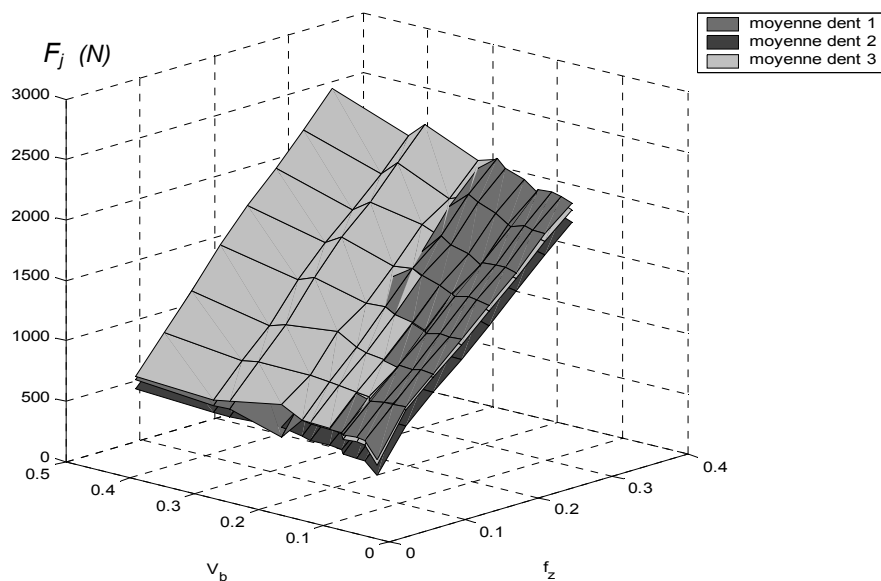


Figure 123. Entités extraites des signaux.

La Figure 124 présente les estimations moyennes du battement radial simple des dents 2 et 3, à chaque niveau d'usure. On remarque immédiatement une brusque augmentation du battement de la dent N°3 lorsque l'usure en V_b vaut 0,21 mm. A ce niveau d'usure là, Garnier a constaté un phénomène de copeau adhérent au cours de ses essais, qui a été confirmé par son analyse des signaux d'efforts [Gar00]. Notre critère de S.U.I. abonde dans le même sens. En effet, l'augmentation de battement signifie que la dent 3 usine davantage et cela peut s'expliquer par un copeau adhérent. De plus, lorsqu'aux niveaux d'usure suivants, le battement estimé de la dent 3 retourne à ses niveaux précédents, cela confirme qu'il y a eu un copeau adhérent qui a ensuite disparu. Une autre explication serait que les dents 1 et 2 se soient écaillées simultanément à des niveaux identiques, ce qui est peu probable. Néanmoins, cet exemple illustre bien l'intérêt d'utiliser un système d'inspection des outils hors-usinage, pour confirmer les interprétations des signaux d'efforts. Car, en cas de copeau adhérent, l'usinage peut continuer ; alors qu'en cas d'endommagement simultané de 2 des 3 dents, il est important de stopper immédiatement l'usinage de la pièce.

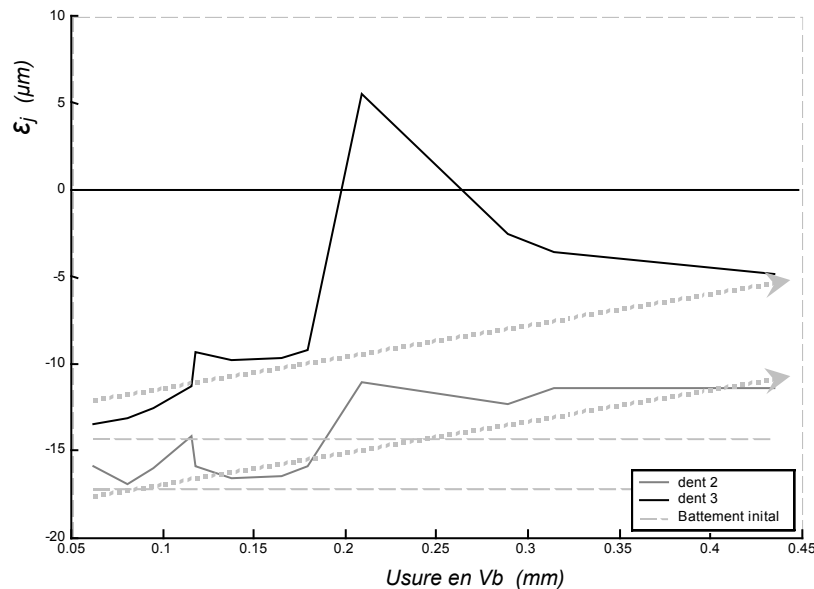


Figure 124. Estimations du battement radial des dents en fonction de l'usure.

Quant au phénomène d'usure, nos estimations de battement radial permettent de constater une évolution lente et progressive tendant à niveler les différences de battement entre les dents. En effet, l'usure tend à faire reculer les arêtes de coupe. Néanmoins, l'usure atteint des niveaux très importants au cours de ces essais : un V_b de 0,45 mm. Aussi, notre critère n'est pas suffisamment sensible à l'usure pour permettre son estimation : Tant que les niveaux d'usure restent conventionnels, c'est-à-dire jusqu'à des V_b de 0,2 à 0,3 mm ; nous pouvons noter que l'amplitude des variations des estimations de battement reste faible. Elle est de 5 μm environ (nous ne pouvons pas être plus précis à cause du copeau adhérent). Ainsi, ces variations dues à l'usure restent bien inférieures aux seuils de détection d'endommagement, qui sont généralement à $\pm 15 \mu\text{m}$ environ, et ne vont pas perturber la surveillance d'usinage.

Par conséquent, de faibles endommagements de l'outil pourront ainsi être détectés tout au long de la vie de l'outil, par la méthode de SUI, et un autre critère sera utilisé pour suivre l'usure de l'outil.

3. Choix du capteur

Nous avons validé notre méthode de S.U.I. en utilisant une table dynamométrique. Mais nous avons vu au chapitre I que cette solution présente des limitations importantes. Elle est onéreuse, fragile et seul l'usinage de pièces de petite taille peut être surveillé. Ainsi, elle n'est pas applicable en milieu industriel. Nous allons donc nous intéresser aux capteurs pouvant être une alternative à la platine d'effort.

3.1. Puissance consommée par la broche

La puissance consommée par la broche pourrait être une alternative très intéressante. Elle est peu onéreuse, facile à mettre en oeuvre dans la machine-outil et permet de surveiller n'importe quel type de production (quelles que soient la géométrie de la pièce, l'opération réalisée et la structure la machine). Néanmoins, l'étude bibliographique du chapitre I a montré que la bande-passante risque d'être trop limitée. Lors des séries d'expérimentations C et D, les signaux de puissance de broche ont été mesurés afin de le vérifier.

Notre transducteur de puissance utilise la technique du « shunt » (présentée au chapitre I). Entre le transducteur de puissance et le système d'acquisition des signaux, un filtre actif du 5e ordre coupant à 500 Hz a été placé. Lors des essais réalisés avec l'outil à 5 dents, la fréquence de passage des dents est de 412 Hz. Cette composante n'est donc pas affectée par le filtrage. Or, en effectuant une transformée de Fourier des signaux de puissance, il n'y a pas de composante située à la fréquence de passage des dents (Figure 125).

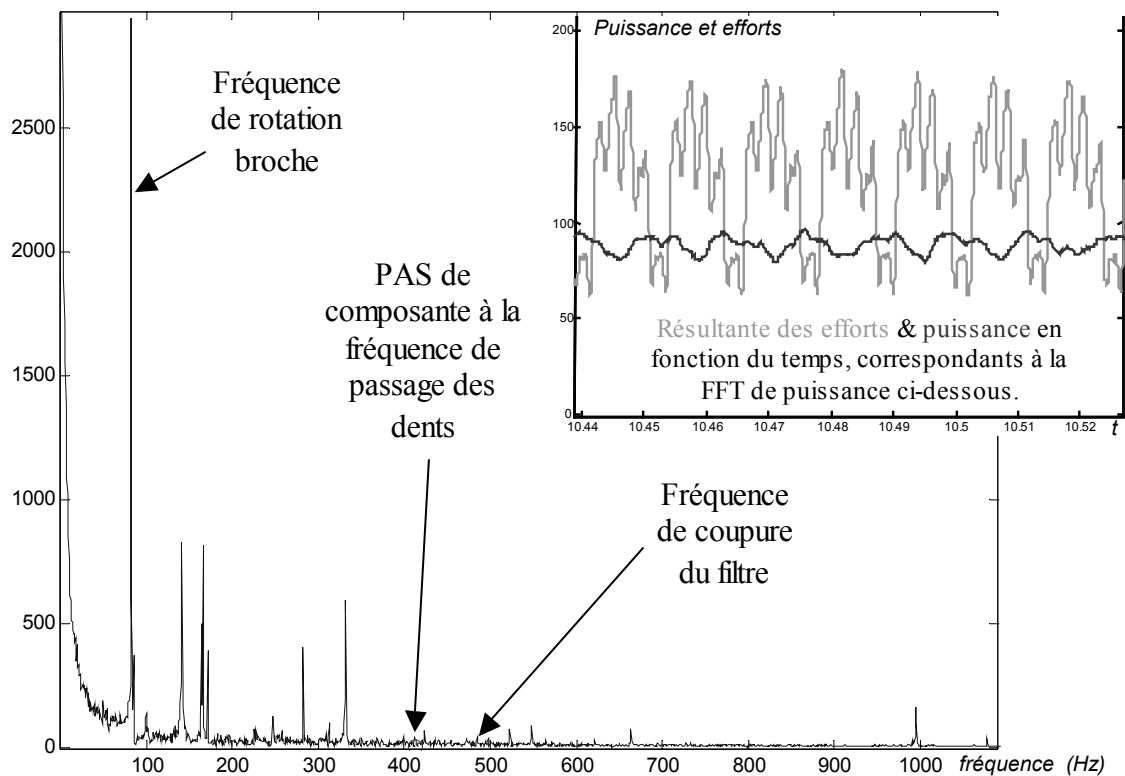


Figure 125. Transformée de Fourier de signaux de puissance de broche (rainurage avec un outil à 5 dents).

Comme la composante située à la fréquence de passage des dents porte l'effet du battement radial des dents [Kli83] et qu'elle n'apparaît pas dans la FFT, la bande-passante de la puissance consommée par le moteur de broche n'est pas suffisante pour appliquer notre méthode de S.U.I.

Une alternative serait d'effectuer une surveillance d'usinage à partir de valeur moyenne de puissance. Au chapitre III, nous avons mené une telle étude à partir des signaux d'effort moyens, en comparant les valeurs obtenues avec un outil neuf puis endommagé, pour de mêmes jeux de conditions de coupe. La même méthode a été appliquée aux signaux de puissance de broche. Les niveaux de puissances moyennes mesurées lors des essais D réalisés avec l'outil à 5 dents (détections de bris présentées à la fin du chapitre précédent) ont été traités.

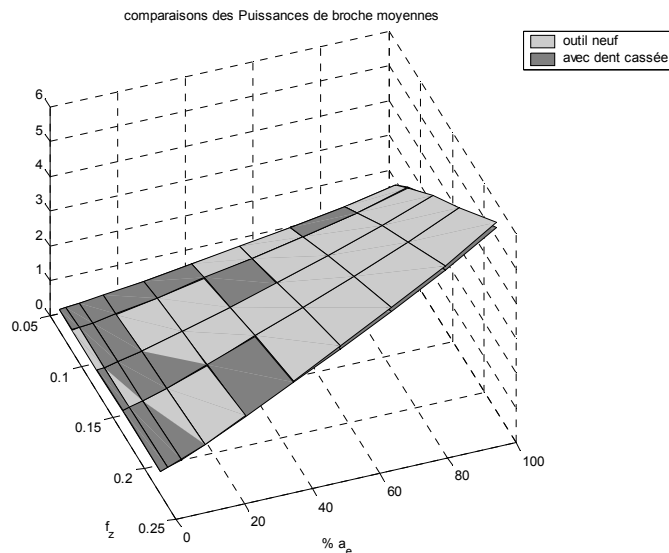


Figure 126. Puissance moyenne consommée par la broche en fonction de l'avance et de l'engagement radial (outil à 5 dents neuf puis endommagé).

Les résultats sont similaires à ceux obtenus à partir des efforts de coupe, Figure 126. Les puissances consommées par la broche sont généralement supérieures avec un outil possédant des plaquettes neuves mais les écarts restent faibles (moins de 5%). Ils ne permettent pas une détection fiable.

A cause de la bande-passante trop limitée des signaux de puissance, nous ne pourrions pas leur appliquer notre méthode.

3.2. Capteurs inductifs

Il nous a semblé intéressant d'étudier si les capteurs inductifs permettent de mettre en œuvre notre méthode de SUI. En effet, si les capteurs sont placés à proximité de la broche et que cette solution s'avère viable, elle présenterait le grand avantage de permettre de surveiller n'importe quel type de production (opération, pièce, structure machine : 3 axes, 5 axes, sérielle, parallèle,...).

Seo [Seo98] puis Larue [Lar03] ont constaté et modélisé les déformations de l'outil dues aux actions mécaniques résultant de l'usinage (en vue de les compenser lors de la génération de trajectoires). Nous proposons ici de mesurer, directement et pendant l'usinage, ces déformations de l'ensemble {axe de broche + outil}. En effet, des capteurs inductifs ont été mis en oeuvre pour analyser le comportement des broches par Peigné, Laporte et Furet (dans le cadre du projet UGV Alu/Composites des Pays de la Loire [UGV06]) et les signaux mesurés semblaient donner une image correcte des actions mécaniques mises en jeu pendant l'usinage.

C'est pourquoi, dans le cadre de travaux de thèse présentés dans ce manuscrit, nous avons utilisé cette technologie de capteurs et, après avoir mené une étude de faisabilité, nous avons développé une application de notre système de SUI spécifique aux capteurs inductifs.

3.2.1. Etude de faisabilité

Lors du cas d'étude présenté au début de ce chapitre, les déplacements du haut du corps de l'outil ont également été mesurés en plaçant des capteurs inductifs en X et en Y au niveau du nez de la broche (Figure 127).

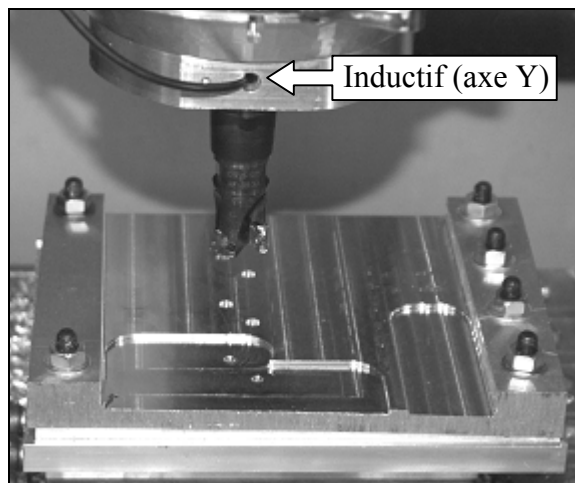


Figure 127. Intégration des capteurs inductifs dans l'outil de production.

Nous allons analyser les mesures réalisées, en appliquant notre procédure de conditionnement des signaux [Rit07b]. La Figure 128 traite de l'usinage où un incident a été détecté à l'aide des efforts et qui a été présenté au paragraphe 1.2. La résultante a été calculée et nous voyons apparaître le passage des dents de l'outil, tour de broche après tour de broche. Cela signifie que la bande-passante des capteurs inductifs est suffisamment large pour permettre de mesurer l'effet du battement radial des dents sur les actions mécaniques générées à chaque passage de dent. Ceci est de très bon augure pour appliquer notre méthode et valide l'étude de faisabilité.

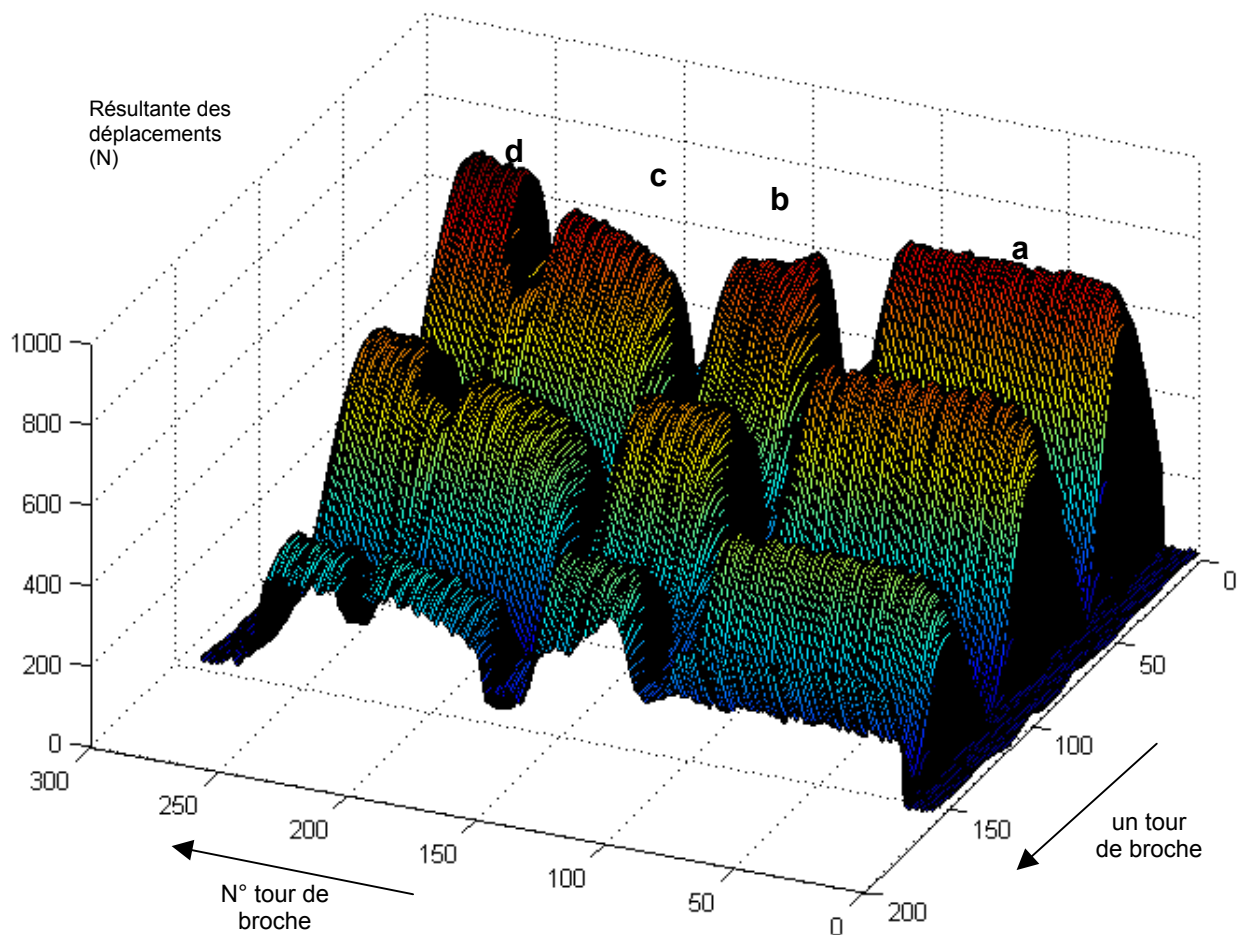


Figure 128. Signatures des inductifs au cours de l'usinage de la pièce.

En comparant les Figure 113 et Figure 128 qui représentent le même usinage où un incident a été détecté, nous pouvons nous apercevoir que les mesures réalisées avec les inductifs sont plus bruitées. Ainsi, nous allons adapter la zone où les entités « moyenne dent en prise » sont extraites. L'étude de robustesse du chapitre précédent nous a conduit à choisir le seuil détectant qu'une dent est prise à 10%. Pour réduire l'effet des vibrations à basses fréquences de la Figure 128, nous placerons désormais ce seuil à 30% pour les capteurs inductifs.

Nous allons maintenant appliquer notre méthode de S.U.I..

3.2.2. Etalonnage

L'étape préalable à l'application de notre méthode, est l'étalonnage de ce nouvel instrument de mesure. En effet, les déplacements mesurés au niveau du nez de la broche correspondent aux déformations de l'ensemble {moyeu de broche + outil} dues aux efforts de coupe. Pour chaque nouvel outil dont l'usinage souhaite être surveillé, il faut identifier sa raideur (afin d'entrer des valeurs réalistes dans le modèle d'efforts de coupe). Notons que cette opération n'a besoin d'être réalisée qu'une seule fois par corps d'outil. Par contre, les 4 passes d'étalonnage renseignant le

modèle d'efforts de coupe doivent être usinées à chaque fois que les plaquettes sont changées (afin d'identifier le nouveau battement radial des dents).

Afin d'identifier la raideur de l'outil, une table dynamométrique est placée sous un échantillon de matière où les 4 passes d'étalonnage vont être réalisées. Pour ces 4 jeux de conditions de coupe, les efforts et déplacements moyens sont calculés, puis la raideur est obtenue par régression linéaire, Figure 129.

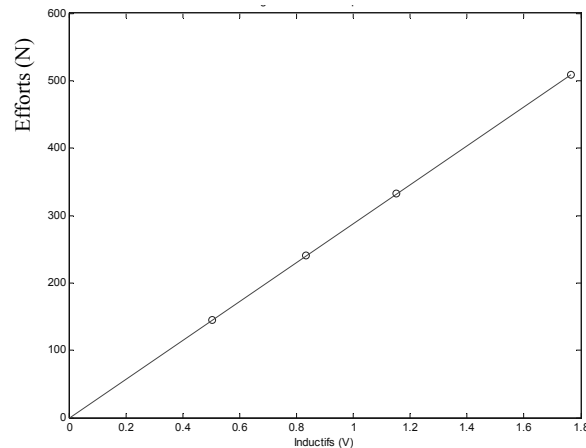


Figure 129. Etalonnage des capteurs inductifs.

Nous avons ici obtenu un coefficient de 288,3 N/V, avec une corrélation de 99,999% (ce qui laisse présager d'une bonne linéarité entre les mesures des 2 instruments).

Les capteurs inductifs étalonnés, nous pouvons maintenant comparer les signatures de l'outil mesurées avec la platine d'effort (en pointillés) et avec les capteurs inductifs (trait fort), Figure 130.

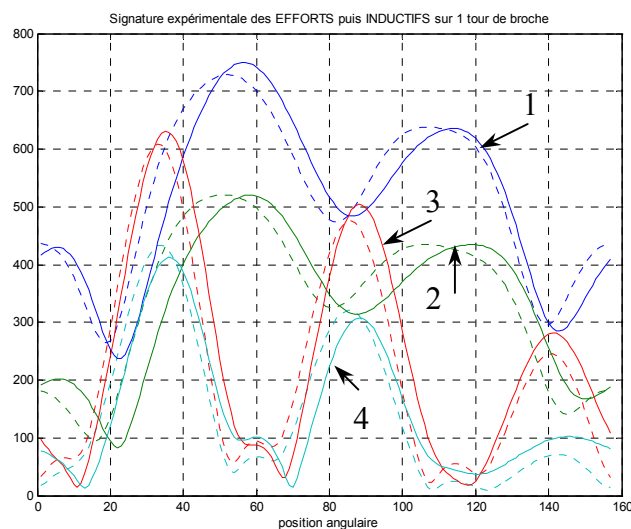


Figure 130. Comparaison des signatures de l'outil sur les 4 passes d'étalonnage ; efforts en pointillés et inductifs en trait fort.

Les signaux sont de formes similaires et nous remarquons que ceux des inductifs sont ici retardés de $9,2^\circ$ ou encore de 0,2 ms. En appliquant la procédure d'étalonnage aux signaux d'efforts, les modèles d'efforts de coupe sont renseignés par : $k_t = 1090$ MPa, $p = -0,27$ et les battements radiaux $\varepsilon_{1\text{ sim}} = 0$, $\varepsilon_{2\text{ sim}} = +11$, $\varepsilon_{3\text{ sim}} = -42$ μm pour les simulations numériques ; et $K_c = 1300$ MPa pour les estimations de battement par le critère, ainsi que des seuils de détection d'endommagement de l'outil à $\pm 18,4$ μm . En appliquant la méthode aux signaux des inductifs maintenant, il résulte : $k_t = 1093$ MPa, $p = -0,27$, $\varepsilon_{1\text{ sim}} = 0$, $\varepsilon_{2\text{ sim}} = +10$, $\varepsilon_{3\text{ sim}} = -40$ μm , $K_c = 1260$ MPa et les seuils de détection d'endommagement de l'outil à $\pm 19,9$ μm .

En réglant le paramètre de l'entité « moyenne dent en prise » à 30%, nous obtenons ainsi des résultats similaires. Surtout, les seuils de détection d'endommagements de l'outil peuvent être placés avec la même précision, autour de la valeur nominale, et ainsi envisager de détecter de faibles endommagements de l'outil.

3.2.3. Surveillance d'Usinage Intelligente

Appliquons notre méthode aux signaux des inductifs mesurés lors de l'usinage de la pièce au cours duquel un incident a été provoqué (Figure 128). La carte de contrôle de l'état de l'outil suivante a été établie :

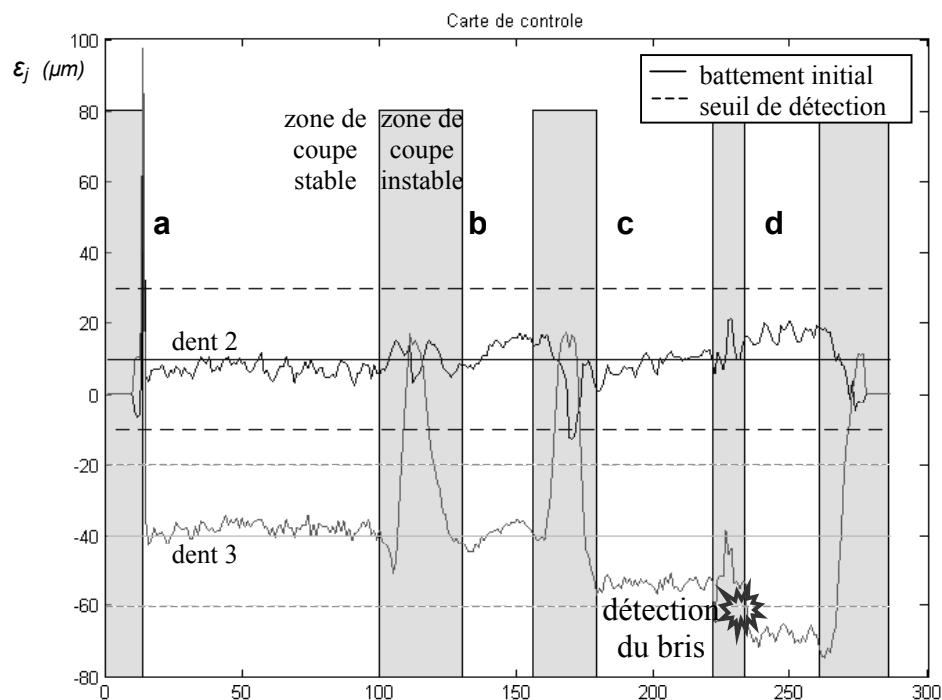


Figure 131. Carte de contrôle de l'état de l'outil, établie à partir des signaux des inductifs.

On retrouve la Figure 116. En effet, tout comme avec les signaux d'efforts, le léger écaillage de l'outil est détecté dès le début de la zone stable qui suit l'incident, à l'aide des capteurs inductifs maintenant. L'application de notre méthode avec des capteurs inductifs est ainsi validée.

Nous venons de montrer que la solution que nous avons proposée, basée sur une technologie de capteurs peu onéreuse et utilisable dans un grand nombre de configurations d'usinages, présente une bande-passante suffisante pour détecter de très faibles endommagements des dents de l'outil. C'est donc là un résultat très intéressant et très prometteur.

4. Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons traité intégralement un cas industriel d'usinage afin de tester notre système de Surveillance d'Usinage Intelligente et de Mesure d'Outil (*SUIMO*). Il s'agit de l'usinage par balayage d'une poche ouverte, au cours duquel nous avons provoqué un bris de plaquette en plaçant un insert sur la trajectoire de l'outil. L'étalonnage et la préparation ont tout d'abord été effectués et l'outil a également été scanné dans son état initial par notre système d'inspection hors-usinage. Ensuite, une des dents a été légèrement écaillée au cours de l'usinage. Cet incident a été détecté sur la carte de contrôle, établie à partir des entités extraites des efforts. Suite à l'arrêt de l'usinage, une nouvelle inspection de l'outil a confirmé cet écaillage. Notre méthode *SUIMO* a ainsi été validée, dans un cas concret.

L'analyse d'essais d'usure a ensuite montré que notre critère permet de constater que les différences de battement radial entre dents, tendent à se niveler, du fait du recul des arêtes de coupe. Néanmoins, le critère est peu sensible à l'usure ; ainsi une détection fiable d'endommagement des dents (de type écaillage) est possible tout au long de la vie de l'outil.

Nous avons ensuite étudié quel capteur pourrait remplacer avantageusement la platine d'effort et appliquer notre méthode de S.U.I. Les transducteurs de puissance de broche n'ont pas des bandes-passantes suffisantes pour permettre de suivre l'effet du battement radial des dents sur les actions mécaniques. Par contre, nous avons montré que les capteurs inductifs, placés au niveau du nez de la broche, ont une bande-passante suffisante. En appliquant notre méthode, la carte de contrôle de l'état de l'outil a montré que les signaux des inductifs permettent de détecter de très faibles endommagements de l'outil. Sachant que les capteurs inductifs sont très peu contraignants et bons-marchés, les résultats obtenus sont d'autant plus intéressants.

Conclusions et perspectives

1. Conclusions

Pour sécuriser le processus de fabrication, garantir la qualité des pièces et atteindre une pleine productivité, des Systèmes de Surveillance Automatiques de l'Usinage (SSAU) sont nécessaires. Cependant, si des solutions sont proposées pour suivre les systèmes de production où les opérations d'usinage sont répétitives, il n'existe pas actuellement de SSAU fiables et efficaces pour les systèmes de production flexible en fraisage (ces derniers fabriquant notamment les pièces à forte valeur ajoutée). L'objectif des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit, était donc de répondre à ce besoin industriel en proposant une solution efficace et fiable de Surveillance Automatique de l'Usinage pour la production flexible par fraisage.

Lors de l'étude bibliographique, les critères intégrant les caractéristiques de la coupe en fraisage nous ont semblé particulièrement pertinents pour répondre à notre problématique. En effet, de part leur conception, ils peuvent s'adapter à diverses configurations d'usinage. Nous avons donc approfondi l'étude de ces critères, en les mettant en œuvre sur une pièce test dans des conditions de coupe et de trajectoires industrielles.

Nous avons identifié que les critères retenus n'arrivaient pas à distinguer correctement les variations des efforts qui sont dues à un endommagement de l'outil, de celles qui sont dues à des changements de conditions de coupe. Il en résulte un grand nombre d'arrêts intempestifs de la production.

Ce travail nous a permis de mieux caractériser les besoins des SSAU pour les productions flexibles. Notamment, comme il n'est pas possible de prédire quand un écaillage (par exemple) va avoir lieu, nous avons montré l'importance de détecter de faibles endommagements de l'outil, pour pouvoir réagir avant que l'incident ne devienne catastrophique.

Cela nous a amené à proposer une nouvelle approche, au chapitre III : la Surveillance d'Usinage Intermittente. Pour résoudre le problème de fiabilité des critères précédemment étudiés, nous suggérons de suivre l'évolution de l'état de l'outil seulement sur les zones où la coupe est stable. Un nouveau critère adéquat a été conçu, en couplant des mesures d'efforts à un modèle d'efforts

de coupe en fraisage (de type affine). Ce critère caractérise l'état de l'outil par une estimation du battement radial de ses dents. Or, tant qu'aucun incident n'a eu lieu, l'état de l'outil reste le même. Par conséquent, les estimations de battement radial doivent être indépendantes des conditions de coupe.

Des expérimentations ont validé l'approche par des détections fiables de bris de plaquette, sur un large domaine de conditions de coupe. Ces détections étaient satisfaisantes mais elles se limitaient à des endommagements importants. De plus, il n'était pas possible de suivre des outils de plus de 3 dents.

Au quatrième chapitre, nous avons donc amélioré la précision des détections, en affinant les estimations de l'état de l'outil (réalisées pendant l'usinage), grâce à des simulations numériques effectuées au préalable. Ces simulations sont réalisées à partir d'un modèle d'effort non-linéaire, pour les différentes conditions de coupe allant être rencontrées au cours de l'usinage de la pièce.

Des améliorations ont été proposées pour chaque élément de notre méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente (SUI) ; comme par exemple l'extraction d'une information plus pertinente à chaque passage de dent (l'entité *moyenne dent en prise*). En nous appuyant sur une étude de robustesse, nous avons déterminé une configuration optimale de notre système de SUI. Nous avons notamment montré que le système ne perd pas en robustesse si les variations de l'avance ne sont pas prises en compte ; ce qui est intéressant d'un point de vu pratique.

Nous avons ensuite défini des cartes de contrôle qui permettent de suivre l'historique de l'état de l'outil. Il a été précisé comment régler les seuils de détection d'endommagement de l'outil. De nouvelles expérimentations ont montré la fiabilité des détections de l'état d'un outil à 5 dents. En somme, les limitations de la méthode précédemment évoquées ont été levées. La précision, la robustesse et le domaine de validité de la méthode ont ainsi été améliorés et confortés. La méthode peut s'adapter à un nombre plus important de configurations d'usinage et c'est pourquoi nous parlons dès lors de Surveillance d'Usinage Intelligente.

Au chapitre V, nous avons proposé de coupler notre système de SUI (pendant l'usinage) à un système de Mesure d'Outil qui inspecte les outils hors-usinage pour confirmer les détections. Ceci forme alors notre système de Surveillance d'Usinage Intelligente et de Mesure d'Outil (*SUIMO*, dont la traduction est *SIMTI* – Smart In-process Monitoring and Tool Inspection).

Afin de confirmer de manière pragmatique et robuste l'ensemble de nos développements, ainsi que de montrer que notre méthode permet de détecter un faible endommagement de l'outil survenant au cours de l'usinage d'une pièce, nous avons traité intégralement un cas industriel.

Nous avons ainsi provoqué un léger écaillage d'une des 3 dents de l'outil, au cours de l'usinage de la pièce. En appliquant notre méthode, nous avons pu constater sur la carte de contrôle de l'état de l'outil, que l'endommagement a été correctement détecté. Le système d'inspection des outils a confirmé ce faible écaillage. La méthode *SUIMO* a ainsi été validée, dans un cas concret et dans des conditions d'usinage industrielles.

Nous avons ensuite montré que le critère est peu sensible à l'usure ; ainsi les détections fiables de l'endommagement des dents (de type écaillage) sont possibles tout au long de la vie de l'outil. Pour appliquer notre méthode dans un cadre industriel, nous avons alors cherché une alternative à l'utilisation d'une table dynamométrique. En appliquant notre méthode aux capteurs inductifs, la carte de contrôle de l'état de l'outil a montré que les signaux des inductifs permettent de détecter de très faibles endommagements. En effet, il s'est avéré que les capteurs inductifs ont une bande-passante suffisante. Sachant qu'ils sont très peu contraignants et bons-marchés, les résultats obtenus sont vraiment très intéressants et prometteurs pour l'avenir de l'exploitation industrielle de nos développements.

Nous avons ainsi défini et validé *SUIMO*, un système de Surveillance d'Usinage complet, qui est viable industriellement et qui permet de détecter de faibles endommagements de l'outil lors de productions flexibles par fraisage.

2. Perspectives

Le module de notre système *SUIMO* permettant de suivre de faibles endommagements de l'outil, a été défini dans ce manuscrit. Il pourrait s'inscrire dans le cadre plus général d'un système multi-agents permettant de surveiller l'ensemble du processus de fabrication [Fur03]. Ce dernier serait formé de plusieurs modules fonctionnant en parallèle et communiquant entre eux, comme le suggère la Figure 132.

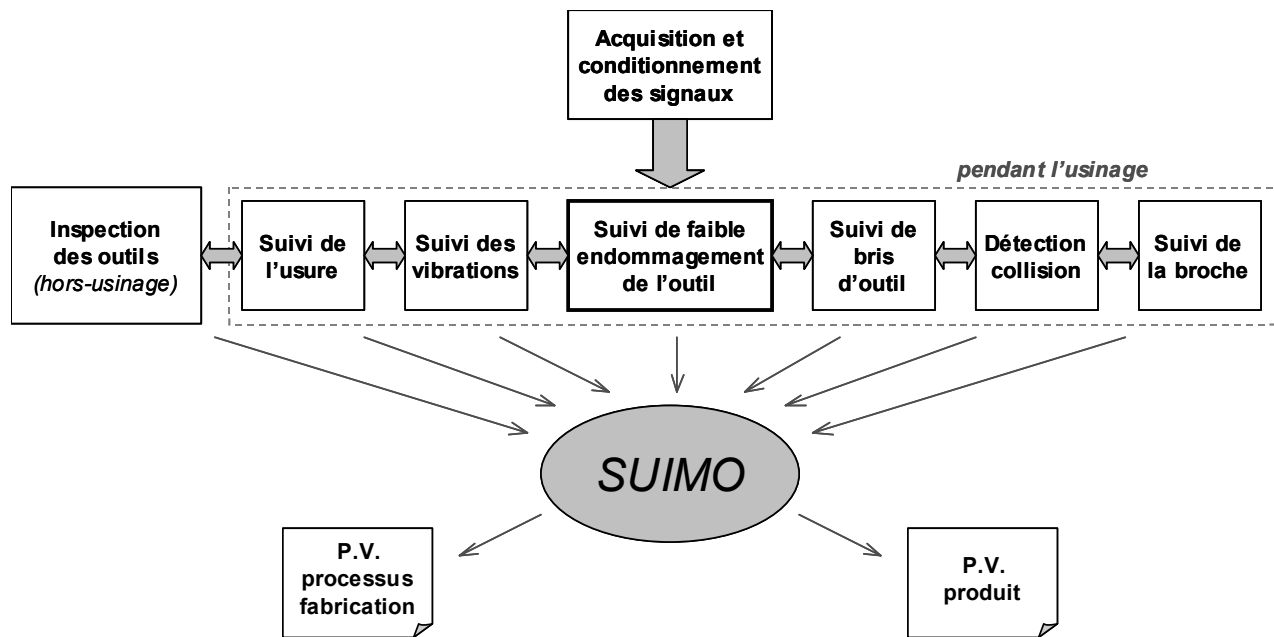


Figure 132. Suivi du processus de fabrication.

A l'aide de différents critères, plusieurs types de dégradation de l'état de l'outil pourraient être suivis : l'usure, un faible endommagement des dents, la casse de l'outil. Ce système permet à la fois d'établir l'état de l'outil par des mesures indirectes au cours de l'usinage, ainsi que par des mesures directes en dehors de l'usinage. Le niveau de fiabilité est ainsi accru. L'état de la broche pourrait également être suivi, tout comme d'autres événements comme les vibrations et les collisions.

2.1. Suivi de faibles endommagements de l'outil

Dans ce manuscrit, nous avons défini un système permettant de détecter de faibles endommagements de l'outil car il peut s'adapter à un grand nombre de configurations d'usinage. Nous avons étendu le domaine de validité de notre méthode de SUI aux fraises cylindriques possédant jusqu'à 5 dents. La méthode est peut-être valable pour des outils possédant davantage de dents. Il faudrait maintenant étudier si le concept est généralisable avec d'autres types d'outils, tels que les fraises toriques qui sont souvent utilisées en ébauche. Suite à la détection d'un endommagement, il serait intéressant de pouvoir qualifier si l'outil est encore apte à usiner.

Ensuite, il conviendrait de s'intéresser au suivi des opérations de finition. Les objectifs seront alors différents : il s'agira moins de permettre une pleine productivité mais davantage de garantir la qualité des pièces. En outre, la diversité des configurations d'usinage pouvant être rencontrées lors de la finition d'une pièce de formes complexes avec un outil boule, sera plus importante et un modèle d'efforts mieux adapté devra probablement être utilisé.

Enfin, nous avons vu que l'utilisation de capteurs inductifs est très prometteuse. Cependant, l'étude de robustesse du chapitre IV a été menée à partir des signaux d'efforts. Les réglages du système de S.U.I. devront donc être adaptés pour permettre des estimations robustes à partir des signaux des capteurs inductifs, cette fois-ci. L'étude de ces capteurs devra par ailleurs être approfondie.

2.2. Suivi des vibrations

Des vibrations peuvent perturber le bon déroulement de l'usinage d'une pièce [Pei03]. L'outil, voire la machine, peut alors être endommagé et la qualité de la pièce est dégradée. Il convient donc de réagir. Les estimations de l'état de l'outil réalisées afin de détecter des endommagements de l'outil de type bris de plaquette, repose sur une correction effectuée par rapport aux simulations numériques. Or, si du broutement survient lors de l'usinage, la signature des efforts sera modifiée et il n'y aura plus de corrélation entre les efforts mesurés et simulés. La surveillance d'endommagements ne sera donc pas fiable. Ainsi, en cas de broutement, le module de détection d'endommagements de l'outil sera désactivé. Un agent permettant de détecter un broutement est donc nécessaire. Actuellement, le système de S.U.I. effectue un diagnostic quant à l'état de l'outil uniquement sur les zones de coupe stable. Par coupe stable, nous entendons que les conditions de coupe ne varient pas. Il faudra également inclure dans cette notion qu'en cas de broutement la coupe est instable et que la surveillance d'endommagements est par conséquent suspendue.

En outre, il a été montré qu'une analyse appropriée des signaux des capteurs inductifs est une source d'information tout à fait exploitable pour la détection du broutement [Kal03]. Un module de suivi des vibrations développé à partir des capteurs inductifs, s'intégrerait donc bien dans notre système SUIMO.

2.3. Suivi de l'usure

Nous savons que notre module de détection d'endommagements de l'outil, est peu affecté par l'usure des outils et qu'il ne permet pas réellement de la suivre. L'usure est un phénomène lent et progressif. Il n'est donc pas nécessaire de la surveiller en permanence. Ainsi, lors de la phase de préparation de la S.U.I. des instructions pourraient être rajoutées dans le programme ISO afin de

spécifier quand l'usure des dents doit être estimée, comme proposé dans le projet SIMON [SIM02]. L'usure de l'outil pourrait alors être estimée à l'aide du critère défini par Garnier [Fur00]. Ce critère pourrait être perfectionné en intégrant davantage de caractéristiques de la coupe en fraisage. Il serait intéressant de l'appliquer ensuite aux capteurs inductifs.

2.4. Suivi de la broche

Des capteurs inductifs pourraient suivre l'évolution de l'état de la broche, en plus de suivre l'usinage des pièces. De tels travaux sont menés par Peigné, Laporte, Garnier et Furet au sein du projet UGV Alu-Composites [UGV06]. En effet, l'état des paliers et les vibrations de la broche peut être suivi [Vaf02].

2.5. Inspection hors-usinage de l'outil

Pour ce qui est de la détection d'endommagements de l'outil, nous avons vu que certains événements peuvent être difficiles à interpréter au seul jugé de signaux d'efforts ou d'inductifs. Par exemple en cas de copeaux adhérents, scanner l'outil à l'aide du système d'inspection hors-usinage peut rapidement confirmer que l'incident ne nécessite pas un arrêt du processus de fabrication et éviter ainsi des arrêts intempestifs de la production qui nuisent à la productivité. En outre, ce système peut également quantifier l'endommagement des dents, grâce aux mesures directes de l'outil qu'il réalise. Il est ainsi possible de juger si l'état de l'outil lui permet de continuer à usiner.

Ainsi, ces contrôles de la géométrie de l'outil peuvent rendre la machine de production et son système de suivi plus autonomes. Ce plus haut degré d'automatisation du système de production peut permettre, par exemple, de continuer à produire des pièces en toute sécurité et en garantissant leur qualité, en dehors des heures d'ouverture de l'entreprise.

2.6. Suivi du processus de fabrication

Les capteurs placés dans la MOCN peuvent aider à générer des informations de plus haut niveau sur le processus de fabrication et qui sont ensuite transmises au système de supervision. Un pilotage intelligent du procédé d'usinage est alors possible [Fur05].

En outre, les cartes de contrôle de l'état de l'outil que nous avons définies dans ce manuscrit, permettent de suivre la partie du processus de fabrication d'un produit qui est réalisée par un outil donné. En joignant toutes les cartes de contrôle concernant un outil donné, il est possible de suivre l'historique de son état. Un Procès Verbal pourrait être établi à partir de toutes les cartes de contrôle concernant une machine donnée. Il spécifierait qu'elle est en état ou qu'une action de maintenance préventive doit être planifiée.

De même, un Procès Verbal pourrait être établi à partir de toutes les cartes de contrôle concernant un produit donné. Il permettrait une traçabilité et spécifierait alors qu'un produit est bon notamment parce que le procédé s'est bien déroulé.

Ainsi, un système de suivi du processus de fabrication, basé entre autres sur l'utilisation de capteurs inductifs, pourrait comporter différents modules, chacun d'eux permettant de détecter un événement précis ou de générer une information particulière. Il serait alors possible de préserver l'état du système de production, tout en garantissant la qualité des pièces. Les points présentés ici ne sont, bien sûr, pas exhaustifs. Nous aurons ainsi vu que le champ d'application de l'instrumentation d'une machine est vaste et ne se limite pas à la détection de bris.

Références bibliographiques

- [Alb05] ALBRECHT A., PARK S., ALTINTAS Y., PRITSCHOW G., “High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 9, p. 993-1008, 2005.
- [Alr03] AL-REGIB E., NI J., LEE S.H., “Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 12, p. 1229-1240, 2003.
- [Alt88] ALTINTAS Y., “In-process detection of tool breakage’s using time series monitoring of cutting forces”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 28, No. 2, p. 157-172, 1988.
- [Alt89] ALTINTAS Y., YELLOWLEY I., “In-process detection of tool failure in milling using cutting force models”, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, p. 149-157, 1989.
- [Alt92] ALTINTAS Y., “Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements”, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, p. 386-392, 1992.
- [Alt01] ALTINTAS Y., “Mechanics and dynamics of general milling cutters.: Part II: inserted cutters”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 15, p. 2213-2231, 2001.
- [Ans95] ANSELMETTI B., “Automatic set-up of tool monitors by a CAM system”, *Computer in Industry*, Vol. 26, No. 2, p. 135-145, 1995.
- [Arm89] ARMAREGO E.J.A., DESPLANDE N.P., “Computerized predictive cutting model for cutting forces in end-milling including eccentricity effects”, *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, p. 45-49, 1989.
- [Art02] ARTIS, “Mesuring transducer MU3 - db_mu3_vers_5_gb_web.pdf”, *Artis GmbH, Bispingen-Behringen*, 2002.
- [Auc04] AUCHET S., CHEVRIER P., LACOUR M., LIPINSKI P., “A new method of cutting force measurement based on command voltages of active electro-magnetic bearings”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 14, p. 1441-1449, 2004.
- [Bar91] BARLIER C., “Mesure en continu de l'usure des outils de coupe par micro-sondes incorporées”, *thèse de l'ENSAM Paris*, 1991.
- [Bat05] BATTAGLIA J.L., KUSIAK A., “Estimation of heat fluxes during high speed drilling”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, p. 750-758, 2005.
- [Ber83] BERTOK P., TAKATA S., MATSUSHIMA K., OOTSUKA J., SATA T., “A system for monitoring the machining operation by referring to a predicted cutting torque pattern”, *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 1, p. 439-444, 1983.
- [Bla03] BLANC N., “La surveillance d'usinage en UGV”, *mémoire CNAM Loire Atlantique*, 2003.
- [Bru94] BRUNSCHWIG G., PALSKY A., “Maîtrise statistique des processus (MSP) Utilisation des cartes de contrôle”, *Techniques de l'Ingénieur*, No. r290, 1994.
- [Byr95] BYRNE G., DORNFELD D., INASAKI I., KETTELER G., KÖNIG W., TETI R., “Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of Research and Industrial Application”, *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 2, p. 541-567, 1995.
- [Che00] CHEN J.C., “An effective fuzzy-nets training scheme for monitoring tool breakage”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 11, No. 1, p. 85-101, 2000.
- [Che04] CHERIF M., THOMAS H., FURET B., HASCOET J.Y., “Generic modelling of milling forces for CAD/CAM applications”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 1, p. 29-37, 2004.
- [Che99] CHEN J.C., CHEN W.L., “A tool breakage detection system using an accelerometer sensor”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 10, p. 187-197, 1999.
- [Cho00] CHOUDHURY S.K., RATH R., “In-process tool wear estimation in milling using cutting force model”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, p. 113-119, 2000.
- [Cho99a] CHOI D., KWON W.T., CHU C.N., “Real time monitoring of tool fracture in turning using sensor fusion”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 5, p. 305-310, 1999.
- [Cho99b] CHO D.W., LEE S.J., CHU C.N., “The state of machining process monitoring research in Korea”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 11, p. 1697-1715, 1999.

- [Chu03] CHUNG K.T., GEDDAM A., "A multi-sensor approach to the monitoring of end milling operations", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, p. 15-20, 2003.
- [Dae05] DAERR A., "Cours de Méthodes Numériques - Licence de Physique - Paris VII", 2005.
- [Dey95] DEYUAN Z., HUNTAY H., DINGCHANG C., "On-line detection of tool breakages using teletering of cutting forces in milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 1, p. 19-27, 1995.
- [Dig02] DIGITALWAY, "Fiche de présentation générale", *DigitalWay*, Saint Etienne, 2002.
- [Dim00] DIMLA D.E., "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 8, p. 1073-1098, 2000.
- [Dor03] DORNFELD D., LEE Y., CHANG A., "Monitoring of Ultraprecision Machining Processes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 8, p. 571-578, 2003.
- [Duc98] DUC E., "Usinage de formes gauches, contribution à l'amelioration de la qualité des trajectoires", *thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 1998.
- [Dug02] DUGAS A., TERRIER M., HASCOET J.Y., "Free form surface measurement method and machine qualification for high speed milling", *Proceedings of IDMMME*, p. 1-10, 2002.
- [Elw96] EL-WARDANY T.I., GAO D., ELBESTAWI M.A., "Tool Condition Monitoring in drilling using vibration signature analysis", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 6, p. 687-711, 1996.
- [Ert03] ERTEKIN Y., KWON Y., TSENG T., "Identification of common sensory features for the control of CNC milling operations under varying cutting conditions", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 9, p. 897-904, 2003.
- [Fur00] FURET B., GARNIER S., PARIS H. "Cutting forces knowledge and analysis, for monitoring systems in High Speed Milling", *2nd CIRP International Seminar on Improving Machine Tool Performance*, La Baule, France, 2000.
- [Fur02] FURET B., GARNIER S., "La surveillance automatique de l'Usinage à Grande Vitesse", *2e assises UGV*, Lille, France, p. 221-230, 2002.
- [Fur03] FURET B., GARNIER S., "A multi-agent approach for a monitoring system in milling", *ASME Proceedings of IMECE*, No. 42236, p. 1-7, 2003.
- [Fur05] FURET B., "Optimisation, préparation, mise en oeuvre et surveillance automatique de l'Usinage à Grandes Vitesses des métaux et des matériaux composites.", *Habilitation à Diriger des Recherches de l'Ecole Centrale et Université de Nantes*, 2005.
- [Fur94] FURET B., "Système de surveillance automatique de l'usinage en fraisage par l'analyse du courant de broche", *thèse de doctorat de l'Ecole Centrale et Université de Nantes*, 1994.
- [Gar00] GARNIER S., "Détermination de paramètres descriptifs de l'état d'usure d'outils pour le développement d'un système de surveillance automatique de l'usinage en fraisage", *thèse de doctorat de l'Ecole Centrale et Université de Nantes*, 2000.
- [Gar05] GARNIER S., RITOU M., FURET B., HASCOET J.Y., "Comparison and Analysis of In-process Tool Condition Monitoring Criteria in Milling", *7th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology*, Udine, Italy, p. 523-532, 2005.
- [Gu91] GU F., KAPOOR S.G., DE VOR R.E., BANDYOPADHYAY P., "An approach to on-line cutter runout estimation in face milling", *Transactions of NAMRC/SME*, p. 240-247, 1991.
- [Has06] HASCOET J.Y., RAUCH M., "Trochoidal and plunging strategies in rough pocket milling of aluminium alloys", *5th International Conference on High Speed Machining*, Metz, France, p. 649-661, 2006.
- [Hek97] HEKMAN K.A., LIANG S.Y., "In-process monitoring of end milling cutter runout", *Mechatronics*, Vol. 7, No. 1, p. 1-10, 1997.
- [Hua00] HUANG P.T., CHEN J.C., "Neural Network-Based Tool Breakage Monitoring System for End Milling Operations", *Journal of Industrial Technology*, Vol. 16, No. 2, p. 1-7, 2000.
- [Ina94] INASAKI I., "Monitoring of Cutting and Gridding in Japan", *Proc. CIRP Workshop on Tool Condition Monitoring*, Vol. 3, p. 43-49, 1994.
- [Jap78] JAPAN SOCIETY FOR THE PROPOTION OF MACHINE INDUSTRY, Technical research institute, machining data files 704F00, 1978.
- [Jay01] JAYARAM S., KAPOOR S.G., DE VOR R.E., "Estimation of specific cutting pressures for mechanistic cutting force models", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 2, p. 265-281, 2001.

- [Jem95] JEMIELNIAK K., KOSMOL J., "Tool and process monitoring - state of art and future prospects", *Scientific paper of the Institute of Mechanical Engineering and Automation of the Technical University of Wroclaw*, No. 61, p. 90-112, 1995.
- [Jem99] JEMIELNIAK K., "Commercial Tool Condition Monitoring Systems", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 10, p. 711-721, 1999.
- [Jun02] JUN M.B., OZDOGANLAR O.B., DE VOR R.E., KAPOOR S.G., KIRCHHIEM A., SCHAFFNER G., "Evaluation of a spindle-based force sensor for monitoring and fault diagnosis of machining operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 6, p. 741-751, 2002.
- [Jun99] JUN M.B., SUH S.H., "Statistical tool breakage detection schemes based on vibration signals in NC milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 11, p. 1733-1746, 1999.
- [Kae97] KAEVER M., WECK M., "Intelligent process monitoring for rough milling operations based on digital drive currents and machine integrated sensors", *ASME MED - Manufacturing Science and Technology*, Vol. 6, No. 1, p. 97-104, 1997.
- [Kae99] KAEVER M., PLATEN S., WECK M., "Control Integrated Process Monitoring for Rough Milling Operations - Innovative Logging Module Solutions", *Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Leuven, Belgium*, p. 727-736, 1999.
- [Kal03] KALINSKI K.J., "The spindle speed optimal control as a mean of chatter vibration surveillance", *Revue Internationale d'Ingénierie des Systèmes de Production Mécanique*, No. spécial, p. 30-40, 2003.
- [Kan01] KANG M.C., KIM J.S., KIM J.H., "A monitoring technique using a multi-sensor in high speed machining", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, p. 331-336, 2001.
- [Kas95] KASASHIMA N., MORI K., HERRERA-RUIZ G., TANIGUCHI N., "Online Failure Detection in Face Milling Using Discrete Wavelet Transform", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, p. 483-487, 1995.
- [Ket01] KETTELER G., "IDMAP - Intelligent Devices for the on-line and real-time monitoring, diagnosis and control of MACHining Processes", *Bosch report*, 2001.
- [Kim01] KIM G.D., CHU C.N., "In-Process Tool Fracture monitoring in Face Milling Using Spindle Motor Current and Tool Fracture Index", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, No. 6, p. 383-389, 2001.
- [Kim96] KIM T.Y., KIM J., "Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 8, p. 925-937, 1996.
- [Kim99] KIM G.D., CHU C.N., "Indirect Cutting Force Measurement Considering Frictional Behaviour in a Machining Centre Using Feed Motor Current", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 7, p. 478-484, 1999.
- [Kis00] KISTLER, "Cutting Force Monitoring with Spindle Integrated Force Sensors - SD20.209e.pdf", *Kistler instrument AG*, 2000.
- [Kis01] KISTLER, "Plateforme de mesure à plusieurs composantes - 9253B", *Kistler instrument AG*, 2001.
- [Kis03] KISTLER, "Dynamomètre rotatif à composantes multiples HS-RCD - 9125A", *Kistler instrument AG*, 2003.
- [Kli82] KLINE W.A., DE VOR R.E., LINDBERG J.R., "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 22, No. 1, p. 7-22, 1982.
- [Kli83] KLINE W.A., DE VOR R.E., "The effect of runout on cutting geometry and forces in milling", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 23, p. 123-140, 1983.
- [Klo99] KLOCKE F., REUBER M., "Process monitoring in mould and die finish milling operations - challenges and approaches", *Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Leuven, Belgium*, p. 747-756, 1999.
- [Klu03] KLUFT W., "Monitoring of tools and machinery with a new Modular Monitoring System - PVE.Ueberwachung.0301.GB.pdf", *Prometec GmbH, Aachen*, 2003.
- [Kut91] KUTZNER K., "Spanferkennung beim Drehen", *RWTH Aachen doctoral thesis*, 1991.
- [Lah06] LAHEURTE R., CAHUC O., DARNIS P., GERARD A., "Behaviour law for cutting process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, No. 1-2, p. 17-23, 2006.
- [Lan86] LAN M.S., NAERHEIM Y., "In-process detection of tool breakage in milling", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, p. 191-197, 1986.

- [Lap03] LAPUJOLADE F., "Simulation des phénomènes vibratoires intervenant en usinage. Etat des recherches et perspectives", *Habilitation à Diriger des Recherches de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris*, 2003.
- [Lar03] LARUE A., "Prise en compte des déformations d'un outil dans le calcul de trajectoires d'usinage en fraisage de profil", *Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 2003.
- [Lar04] LARTIGUE C., TOURNIER C., RITOU M., DUMUR D., "High-performance NC for HSM by means of polynomial trajectories", *Annals of the CIRP*, Vol. 53, No. 1, p. 317-320, 2004.
- [Lee02] LEE T.M., YANG M.Y., "Hybrid Spindle Current Regulation System With Tool Wear Detection Algorithm", *ASME Proceedings of IMECE*, No. 39097, p. 1-7, 2002.
- [Lee95] LEE J.M., CHOI D.K., KIM J., CHU C.N., "Real time tool breakage monitoring for NC milling process", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, p. 59-62, 1995.
- [Lee99] LEE B.Y., TARNG Y.S., "Application of the Discrete Wavelet Transform to the monitoring of tool failure in end milling using the spindle motor current", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 4, p. 238-243, 1999.
- [Li01] LI X., "Detection of Tool Flute Breakage in End Milling Using Feed-Motor Current Signatures", *Transactions of ASME/IEEE J. Mechatronics*, Vol. 6, No. 4, p. 491-498, 2001.
- [Li99] LI X., "On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 1, p. 157-164, 1999.
- [Lia02] LIANG S.Y., HECKER R.L., LANDERS R.G., "Machining process monitoring and control : the state-of-the-art", *ASME Proceedings of IMECE*, No. 32640, 2002.
- [Lia03] LIANG M., YEAP T., HERMANSYAH A., RAHMATI S., "Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 14, p. 1497-1508, 2003.
- [Liu96] LIU H.S., LEE B.Y., TARNG Y.S., "Monitoring of drill fracture from the current measurement of a three-phase induction motor", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 6, p. 729-738, 1996.
- [Mar41] MARTELLOTTI M.E., "An analysis of the the milling forces", *Transactions of ASME*, Vol. 63, p. 677-700, 1941.
- [Mat82] MATSUSHIMA K., BERTOK P., SATA T., "In process detection of tool breakage by monitoring the spindle current of a machine tool", *ASME J. of Measurement and Control for Batch Manufacturing*, p. 145-154, 1982.
- [Max88] MAX J., "Pratique du filtrage - Filtrage analogique", *Techniques de l'Ingénieur*, No. r1102, 1988.
- [Mic76] MICHELETTI D.F., KÖNIG W., VICTOR H.R., "In process Tool Wear Sensors for Cutting Operations", *Annals of the CIRP*, Vol. 25, No. 2, p. 483-496, 1976.
- [Mon02] MONOSTORI L., "AI and Machine Learning Techniques for Managing Complexity, Changes and Uncertainties in Manufacturing", *IFAC, 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain*, p. 119-130, 2002.
- [Mon96] MONTRONIX, "Power Sensor - Pres_PS100.pdf", *Montronix Inc., Ann Arbor USA*, 1996.
- [Mor04] MORARU G., BRUN-PICARD D., OULADSINE M., MAS S., "Diagnostic et maintenance prédictive des UGV", *3ème Assises Machines et Usinage Grande Vitesse, Clermont Ferrand*, 2004.
- [Mor83] MORIWAKI T., "Application of acoustic emission measurement to sensing of wear and breakage of cutting tool", *Bulletin of Japan Society of Precision Ingeering*, Vol. 17, No. 3, 1983.
- [Mül02] MÜLLER M.K., "On-line process monitoring in high speed milling with an active magnetic bearing spindle", *Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zürich*, 2002.
- [Nor03] NORDMANN, "Nordmann complete presentation - Nordmann_presentation_eng.pdf", *Nordmann GmbH, Cologne*, 2003.
- [ODo01] O'DONNELL, YOUNG P., KELLY K., BYRNE G., "Towards the improvement of tool condition monitoring systems in the manufacturing environment", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, No. 2, p. 133-139, 2001.
- [Oma03] OMAT, "OMATIVE_Systems_E_web.pdf", *Omat, Jerusalem*, 2003.
- [Oxl89] OXLEY P.L.B., "Mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability", *Hasted Press, New York*, 1989.
- [Par03] PARK S., ALTINTAS Y., "Identification Of Spindle Integrated Force Sensor's Transfer Function For Modular End Mills", *ASME Proceedings of IMECE*, No. 42369, p. 1-8, 2003.

- [Par04] PARIS H., PEIGNE G., MAYER R., "Surface shape prediction in high speed milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 15, p. 1567-1576, 2004.
- [Pei03] PEIGNE G., "Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité de la coupe et la qualité géométrique de la surface usinée : application au fraisage de profil", *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*, 2003.
- [Pil93] PILLET M., "Contribution à la maîtrise statistique des procédés - Cas particulier des petites séries", *Thèse de Doctorat de l'Université de Savoie*, 1993.
- [Pil99] PILLET M., "Contribution à la maîtrise de la qualité des produits industriels", *Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Savoie*, 1999.
- [Pri99] PRICKETT P.W., JOHN C., "An overview of approaches to end milling tool monitoring", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 1, p. 105-122, 1999.
- [Pro03] PROMETEC, "Advanced Spindle Monitoring - S3A ring - Poster_EMO2003.GB.pdf", *Prometec GmbH, Aachen*, 2003.
- [Reh04] REHORN A.G., JIANG J., ORBAN P.E., "State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 7-8, 2004.
- [Rit06a] RITOU M., GARNIER S., FURET B., HASCOET J.Y., "A new versatile in-process monitoring system for milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 15, p. 2026-2035, 2006.
- [Rit06b] RITOU M., GARNIER S., FURET B., HASCOET J.Y., "Detection method of cutter breakage in flexible manufacturing", *5th International Conference on High Speed Machining, Metz, France*, p. 717-725, 2006.
- [Rit06c] RITOU M., GARNIER S., FURET B., HASCOET J.Y., "Estimation of Cutter Eccentricity for Tool Condition Monitoring", *9th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operation, Bled, Slovenia*, p. 397-404, 2006.
- [Rit07a] RITOU M., GARNIER S., FURET B., HASCOET J.Y., "Reliable cutter breakage monitoring during pocket machining operation", *6th International Conference on High Speed Machining, San Sebastian, Spain*, 2007.
- [Rit07b] RITOU M., LAPORTE S., PEIGNE G., FURET B., GARNIER S., HASCOET J.Y., "Instrumentation de la broche par des capteurs inductifs : application à la mesure d'effort et à l'étude du comportement des broches UGV", *10e colloque national AIP PRIMECA, La Plagne, France*, 2007.
- [Rom03] ROMERO-TRONCOSO R.J., HERRERA-RUIZ G., TEROL-VILLALOBOS I., JAUREGUI-CORREA C., "Driver current analysis for sensorless tool breakage monitoring of CNC milling machines", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 15, p. 1529-1534, 2003.
- [Sab60] SABBERWAL A.J.P., "Chip Section and Cutting Force During the Milling Operation", *Annals of the CIRP*, p. 197-203, 1960.
- [Sar01] SARHAN A., SAYED R., NASSR A.A., EL-ZAHRY R.M., "Interrelationships between cutting force variation and tool wear in end-milling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, p. 229-235, 2001.
- [Sat00] SATURLEY P.V., SPENCE A.D., "Integration of Milling Process Simulation with On-Line Monitoring and Control", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 2, p. 92-99, 2000.
- [Sch90] SCHEHL U., ET AL., "Sicherung des spanabhebenden Bearbeitungsprozesses", *KfK Bericht, KfK-PFT*, No. 154, 1990.
- [See99] SEETHALER R.J., YELLOWLEY I., "The identification of radial runout in milling operations", *Transactions of ASME - Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 121, p. 524-531, 1999.
- [Seo98] SEO T.I., "Intégration des déformations outil en génération de trajectoires d'usinage", *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale et Université de Nantes*, 1998.
- [Sha04] SHAO H., WANG H.L., ZHAO X.M., "A cutting power model for tool wear monitoring in milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 14, p. 1503-1509, 2004.
- [SIM02] IMS SIMON Project (Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining - EP 26504), Final report, 2002.
- [Smi91] SMITH S., TLUSTY J., "An overview of modeling and simulation of the milling process", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, p. 169-175, 1991.
- [Son05] SONG D., OTANI Y., AOKI K., KAMAKOSHI T., OHARA Y., TAMAKI H., "A new approach to cutting state monitoring in end-mill machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 7, p. 909-921, 2005.

- [Spi88] SPIEWAK S., WU S.M., "Tool wear monitoring and breakage detection based on intelligent filtering", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 28, No. 4, p. 483-494, 1988.
- [Tan05] TANSEL I.N., BAO W.Y., REEN N.S., KROPAS-HUGUES C.V., "Genetic tool monitor (GTM) for micro-end-milling operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 3, p. 293-299, 2005.
- [Tan88] TANGUY J.C., "Investir en surveillance automatique de l'usinage. Pourquoi et comment ?", *CETIM - Informations*, No. 108, p. 58-65, 1988.
- [Tan93] TANSEL I.N., MCLAUGHLIN C., "Detection of tool breakage's in milling operations-part 1 the time series analysis approach", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 33, No. 4, p. 531-544, 1993.
- [Tar96] TARNG Y.S., CHEN M.C., LIU H.S., "Detection of tool failure in end milling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 57, No. 1, p. 55-61, 1996.
- [Ter05] TERRIER M., "Optimisation du processus de fabrication en usinage à grande vitesse sur machines-outils à structure parallèle", *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale et Université de Nantes*, 2005.
- [Tlu00] TLUSTY J., "Manufacturing Processes and Equipment", *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ*, 2000.
- [Tön03] TÖNSHOFF H.K., LI X., LAPP C., "A Fast Haar Transform and Concurrent Learning to Tool Breakage Detection in Milling", *Transactions of ASME/IEEE J. Mechatronics*, Vol. 8, No. 3, p. 414-417, 2003.
- [Tön88] TÖNSHOFF H.K., WULFSBERG J.P., KALS H.J.J., KÖNIG W., VAN LUTTERVELT C.A., "Development and trends in monitoring and control of machining processes", *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 2, p. 611-622, 1988.
- [Tou97] TOULOUSE D., COUETARD Y., CAHUC O., GERARD A., "Experimental method for the cutting process in three dimensions", *Journal De Physique. IV : JP*, Vol. 7, No. 3, p. 21-26, 1997.
- [Tze04] TZENG G.T., "Encoder-less Synchronized Averaging Using Order Tracking and Interpolation", *ASME Proceedings of IMECE*, No. 61148, 2004.
- [UGV06] Projet UGV Aluminium/Composites, <http://www.ugv-alu-composites.com>, pôle de compétitivité EMC2, 2006.
- [Vaf02] VAFAEI S., RAHNEJAT H., AINI R., "Vibration monitoring of high speed spindles using spectral analysis techniques", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 11, p. 1223-1234, 2002.
- [Wec89] WECK M., "Werkzeugmaschinen, Band 2, Konstruktion und Berechnung", *VDI - verlag, Düsseldorf*, 1989.
- [Wei94] WEIS W., LENGELING A., HÜNTRUP V., "Automatisierte Werkzeugüberwachung und vermessung beim Fräsen mit Hilfe bildverarbeitender Systeme", *tm - Technisches Messen*, Vol. 61, No. 12, p. 473-476, 1994.
- [Xu02] XU S.X., ZHAO J., ZHAN J.M., LE G., "Research on a fault monitoring system in free-form surface CNC machining based on wavelet analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, No. 3, p. 588-591, 2002.
- [Yes06] YESILYURT I., "End mill breakage detection using mean frequency analysis of scalogram", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 3-4, p. 450-458, 2006.
- [Zhe99] ZHENG H.Q., LI X.P., WONG Y.S., NEE A.Y., "Theoretical modelling and simulation of cutting forces in face milling with cutter runout", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 12, p. 2003-2018, 1999.

Annexes du chapitre IV : Précisions et justifications apportées quant à la méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente

Cette annexe développe les points de la méthode de SUI qui sont évoqués de manière plus synthétique au chapitre IV. Les points développés sont :

- l'étalonnage du modèle d'effort
- la validation de l'approche (consistant à compenser les variations des estimations de l'état de l'outil, à l'aide de simulations numériques)
- les fonctions coût de l'optimisation
- le conditionnement des signaux

Pour que la lecture de cette annexe soit cohérente, certains éléments déjà présentés au chapitre IV y sont reportés également.

1. Etalonnage du modèle d'efforts

Après avoir précisé la façon des les efforts de coupe sont calculés, il reste maintenant à spécifier les constantes du modèle d'efforts (bloc *A1* des diagrammes). Nous avons donc défini un protocole pour l'étalonnage.

1.1. Choix des passes d'étalonnage

Nous nous sommes autorisés 4 passes d'étalonnage. En vue d'appliquer notre méthode en milieux industriels, le nombre de passes doit être faible pour que la procédure soit rapide et consomme peu de matière. Ces 4 passes rectilignes sont réalisées avec le même outil et dans la même matière que la pièce (soit sur une éprouvette disposée sur la table de la fraiseuse à côté de la pièce à surveiller, soit directement dans une partie de la pièce autour de laquelle un volume important de matière sera enlevé par la suite, si cela ne présente pas de risques majeurs).

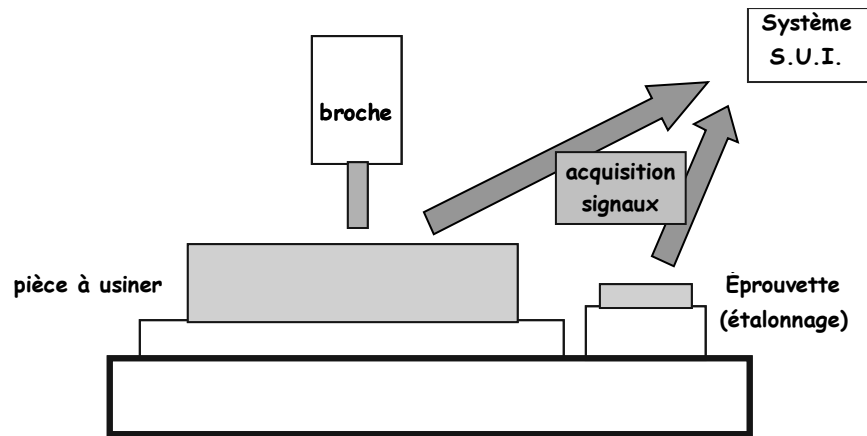


Figure 133. Réalisation de passes d'étalonnage, avant toute surveillance d'usinage.

Afin d'identifier correctement le coefficient p du modèle d'effort, 2 passes doivent être réalisées avec des avances différentes (et un même engagement radial). Les valeurs d'avances choisies sont, tout d'abord, f_{z1} l'avance qui sera programmée pour usiner la pièce. Pour l'autre, une valeur f_{z2} plus faible sera choisie, par exemple $\frac{1}{2} f_{z1}$. Pour calculer p , une valeur importante de a_e est choisie, $a_{e1} = 80$ ou 100% du diamètre de l'outil par exemple (selon l'accessibilité de la zone où ces passes seront réalisées, sur la pièce ou sur l'éprouvette, Figure 134).

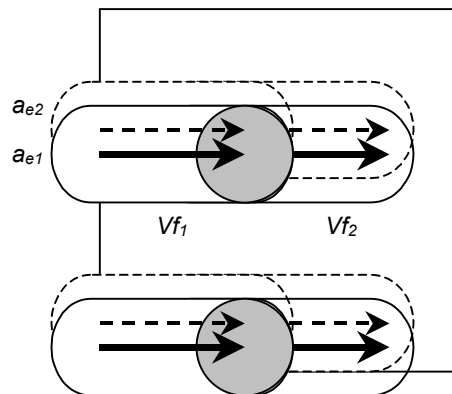


Figure 134. Localisation des 4 passes d'étalonnage.

Néanmoins, si le battement radial est faible (devant l'avance à la dent), il ne sera pas possible d'identifier quelle dent enlève un léger surplus de matière, d'où des erreurs dans les prédictions d'efforts pour un a_e faible. Il faut donc réaliser des passes d'étalonnage avec un engagement radial faible : a_{e2} de 30% par exemple. Il semble donc que le choix de 4 passes d'étalonnage soit un compromis pertinent.

La longueur de ces passes rectilignes sera calculée de sorte à pouvoir extraire au moins 50 tours de broche de la zone de coupe stable. Nous avons vu au chapitre III que les mesures de pics

d'efforts sont plus importantes en avalant qu'en opposition du fait de l'impact de la dent. Il est donc préférable de réaliser les passes d'étalonnage en opposition. La vitesse de rotation de la broche ainsi que l'engagement axial seront choisis identiques à ceux utilisés lors de l'usinage de la pièce. Concernant la série des essais C , les passes d'étalonnage sont donc celles répertoriées dans le Tableau 11.

Passes d'étalonnage	Avance (mm/dent)	Engagement radial (% diamètre)
1	0.12	80 %
2	0.22	80 %
3	0.12	30 %
4	0.22	30 %

Tableau 17. Conditions de coupe des passes d'étalonnage.

1.2. Algorithme de l'étalonnage

L'obtention des entités caractéristiques F_j (pics d'effort ou autre) fait partie de la procédure de conditionnement des signaux (filtrage, ...). Comme on ne peut pas inverser l'effet du filtrage (entre autres) pour calculer directement les constantes du couple outil/matière, des itérations sont nécessaires afin de déterminer les valeurs des constantes qui permettent d'obtenir le résultat simulé le plus proche des entités réelles, extraites des passes d'étalonnage. Cette intégration numérique n'est pas gênante pour notre système de Surveillance d'Usinage Intermittente car l'opération d'étalonnage est effectuée hors-ligne, avant l'usinage de la pièce qui doit être surveillé. La méthode du Simplex nous permet de converger vers les constantes optimales du modèle de coupe. Le calcul des constantes du couple outil-matière est effectué en 5 étapes :

1. usinage de 4 passes d'étalonnage et conditionnement des signaux expérimentaux
2. calcul de valeurs initiales k_{t0} et p_0
3. optimisation de k_t et p à partir des efforts moyens (sans battement radial $\varepsilon_{j\text{ sim}}$ donc)
4. optimisation des $\varepsilon_{j\text{ sim}}$, pour k_t et p fixes
5. optimisation simultanée des $\varepsilon_{j\text{ sim}}$, k_t et p

En effet, en tentant d'optimiser simultanément tous les paramètres (étape 5) directement à partir de valeurs initiales, le calcul peut diverger. Les étapes 3 et 4 sont donc nécessaires. En outre, les valeurs initiales doivent être pertinentes. k_{t0} et p_0 sont classiquement calculés à partir des valeurs moyennes des efforts de coupe [Kli82]. Nous allons identifier ces constantes de coupe à partir des valeurs moyennes de la résultante des efforts sur les 2 passes d'étalonnage où a_e est

important. L'épaisseur nominale de copeau étant connue pour chacune des passes d'étalonnage, les constantes sont obtenues en passant aux logarithmes, équation 55.

$$\ln \overline{F} = (p+1) \ln \overline{h_c} + \ln(k_c \cdot a_p) \quad 55$$

De même, la constante K_c de notre critère de surveillance d'usinage (équation 27), est également identifiée par régression linéaire, à partir des efforts moyens des 2 passes d'étalonnage où l'engagement radial est important.

Quant aux valeurs initiales de battement radial (pour l'étape N°4), elles sont obtenues en appliquant notre critère de SUI aux 2 passes d'étalonnage où a_e est faible.

Nous désignons arbitrairement « dent N°1 », la dent qui enlève le plus de matière et génère les efforts les plus importants. Le battement radial simple des autres dents est ensuite calculé par rapport à cette dent N°1.

Notons que le coefficient k_r du modèle d'efforts est actuellement fixé à 0,5. En effet, suivant la littérature, les valeurs sont généralement comprises entre 0,3 [Tlu00] et 0,6 [Jap78] [Gar00]. Ultérieurement, il sera envisageable d'identifier cette constante si cela s'avère nécessaire.

Lors des boucles d'optimisation, les efforts sont simulés en fonction des valeurs des constantes $\varepsilon_{j\text{ sim}}$, k_t et p , pour les 4 jeux de conditions de coupe des passes d'étalonnage ; puis la procédure de conditionnement des signaux est appliquée et les entités caractéristiques F_j sont extraites. Comme nous cherchons à minimiser les écarts entre simulations et expérimentations, la fonction coût de la boucle d'optimisation est définie par :

$$W_a = \sum_{i,j} (F_{ji} - \hat{F}_{ji})^2 \quad 56$$

où F_{ji} correspond à l'entité caractéristique extraite des signaux expérimentaux au passage de la dent j , lors de la passe d'étalonnage i et où \hat{F}_{ji} est issu des simulations numériques. A la 3^e étape de l'étalonnage, lorsque l'optimisation est basée sur les efforts moyens (page précédente), la fonction coût se simplifie (somme de 4 valeurs au lieu 4.Z valeurs) et porte uniquement sur les écarts entre efforts moyens.

Dans le cas où la position angulaire de l'outil est connue à chaque instant de l'usinage (information du codeur de broche par exemple), une boucle d'optimisation supplémentaire est insérée entre les étapes 4 et 5, afin de mettre en phase les signaux expérimentaux et simulés. Pour ce faire, un premier recalage consiste à faire coïncider les pics d'effort réels et simulés de la

dent qui enlève le plus de matière. La boucle d'optimisation affine ensuite ce réglage, par les moindres carrés en comparant signaux réels et simulés sur un tour de broche.

Maintenant que les principes de fonctionnement du simulateur d'efforts et de la phase d'étalonnage ont été clairement établis, nous allons évaluer la qualité des simulations et tenter de valider l'approche proposée (Figure 75, page 123).

2. Validation de l'approche

Nous allons comparer les résultats obtenus à partir des expérimentations et des simulations à différentes étapes de la méthode ; à savoir suite à l'extraction des entités caractéristiques F_j tout d'abord (blocs A3 et B3 des diagrammes), puis suite à l'estimation du battement radial des dents (blocs A4 et B4 des diagrammes).

2.1. Au niveau des efforts

Dans ce paragraphe, nous allons tester le simulateur d'effort en comparant expérimentations et simulations (c'est-à-dire les résultats des blocs A3 et B3 des diagrammes). Le but de notre simulateur est de pouvoir prédire la valeur de l'entité caractéristique F_j (telle qu'un pic d'effort) extraite de la résultante des efforts pour chaque passage de dent, quelles que soient les conditions de coupe utilisées. Par conséquent, la qualité de notre simulateur sera évaluée à partir de ces entités. L'entité caractéristique F_j dont nous extrayons dans ce paragraphe, est la « moyenne autour du pic ». La Figure 135 montre qu'il s'agit de calculer une valeur moyenne des efforts centrée autour du pic généré par une dent (sur 1/3 de la période de passage des dents). Elle est mieux définie au paragraphe 6.4 et cette entité est plus robuste qu'un simple pic d'effort. Elle sera donc plus pertinente pour juger de la qualité des simulations. Nous la noterons F_j également.

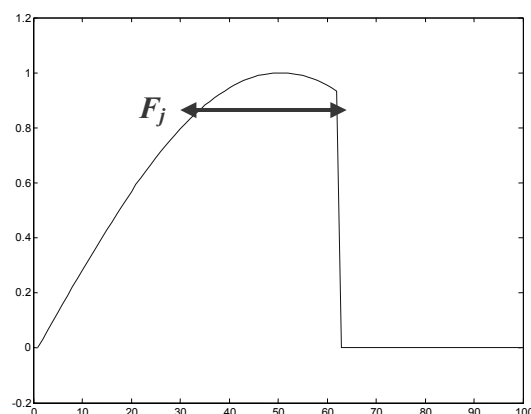


Figure 135. Extraction de l'entité caractéristique « moyenne autour du pic » au passage d'une dent.

Les données mesurées lors de la série d'essais C avec l'outil à 2 dents ayant un battement radial important, sont prises en référence afin d'évaluer la qualité des simulations. A partir des passes d'étalonnage définies Tableau 11, des valeurs initiales des constantes de coupe $k_{t0} = 160$ Mpa et $p_0 = -0,42$ ont été identifiées. Elles ont mené à $k_t = 180$ Mpa et $p = -0,44$ après optimisation. Le battement radial des dents a été estimé à $\varepsilon_{1\text{ sim}} = 0$ et $\varepsilon_{2\text{ sim}} = -21,4$ μm (blocs A1 des diagrammes). Les paramètres du modèle étant identifiés, nous allons pouvoir simuler les efforts de coupe à partir des équations 37 à 41, pour n'importe quel jeu de conditions de coupe (en terme d'avance et d'engagement de l'outil) et en extraire les valeurs de l'entité caractéristique F_j . (blocs A2 puis A3 des diagrammes). La Figure 136 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des conditions de coupe testées lors de la série d'essais C, pour l'outil à 2 dents ayant un battement radial important. Pour chaque jeu de conditions de coupe, les entités F_j sont extraites des efforts simulés au passage de chaque dent et sont reportées en Z, au nœud de maillage de la surface correspondante, sur la Figure 136.

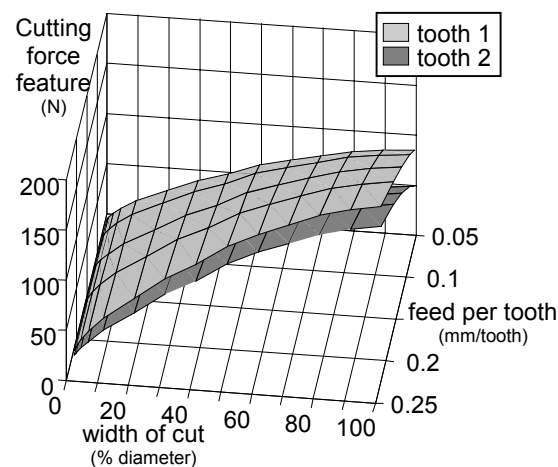


Figure 136. Entité caractéristique extraite des signaux simulés sur une large gamme de conditions de coupe. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c])

Nous pouvons maintenant comparer ces valeurs à celles obtenues expérimentalement pour l'outil à 2 dents, sur l'ensemble des 70 passes de la série d'essais C (avances de 0,06 à 0,22 mm/dent et engagements radiaux de 0,5 à 100 % du diamètre de l'outil). La Figure 137 présente les résultats pour chaque jeu de conditions de coupe (comparaison des résultats des blocs A3 et B3 des diagrammes). L'écart maximal entre les entités F_j réelles et simulées est de ± 10 N. Des résultats satisfaisants sont donc obtenus.

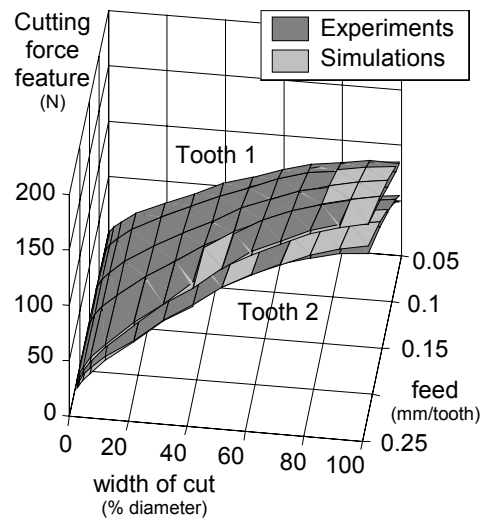


Figure 137. Comparaison des entités caractéristiques obtenues à partir des signaux expérimentaux et simulés. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c])

Quant au modèle inverse, les passes d'étalonnage du Tableau 11 sont simulées pour les constantes du couple outil/matière $\varepsilon_{j\text{ sim}}$, k_t et p obtenues ci-dessus (afin de valider le bloc A1 des diagrammes). Ces passes d'étalonnage simulées sont alors introduites dans le simulateur d'efforts. Les mêmes valeurs de constantes relatives au couple outil/matière, sont identifiées à la suite de phase d'étalonnage et les écarts entre pics d'efforts sont de $\pm 10^{-5}$ N. Nous sommes donc satisfaits par les résultats obtenus.

2.2. Au niveau du battement radial

Il est également possible d'estimer le battement radial des dents (bloc A4 des diagrammes) à partir des signaux d'efforts issus de simulations puis conditionnés (blocs A2-A3 des diagrammes). En effet, les passes d'étalonnage choisies ont permis d'évaluer le coefficient spécifique de coupe K_c à 221 Mpa (nécessaire aux estimations de battement radial par notre critère). La Figure 138 présente les résultats ainsi obtenus. Rappelons que le battement radial simple est déduit de l'estimation du battement radial relatif en fixant celui de la dent N°1 à zéro. Le critère de SUI qui estime le battement radial des dents est basé sur un modèle d'efforts affine. Il est ici appliqué aux simulations d'efforts obtenues, quant à elles, par un modèle non-linéaire. Il semblerait que l'on observe ici les mêmes variations des estimations en fonction des conditions de coupe, que celles observées à partir des signaux réels ; et que donc le modèle non-linéaire simule correctement l'effet réel du battement radial sur les efforts.

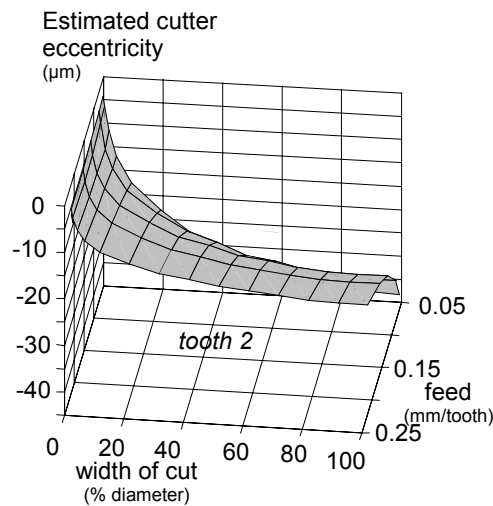


Figure 138. Estimation du battement radial de la dent 2, à partir des entités extraites de signaux simulés sur une large gamme de conditions de coupe. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c])

La Figure 139 présente une comparaison de ces estimations du battement radial simple de la dent N°2 (comparaison entre les blocs A4 et B4 des diagrammes). On peut noter que, dans l'ensemble, les écarts sont relativement faibles ($\pm 9 \mu\text{m}$) selon que les signaux proviennent d'expérimentations ou de simulations (pour un même jeu de conditions de coupe). La modélisation d'efforts de coupe non-linéaire choisie permet donc de simuler correctement ce phénomène. Les estimations sont fidèles lorsque l'engagement radial varie (coefficient de corrélation $R^2 = 97 \%$ sur l'effet moyen de l'engagement radial). On peut s'apercevoir que la corrélation entre les estimations issues de simulations et d'expérimentations, est légèrement moins bonne lorsque l'avance varie (coefficient de corrélation $R^2 = 94 \%$ sur l'effet moyen de l'avance).

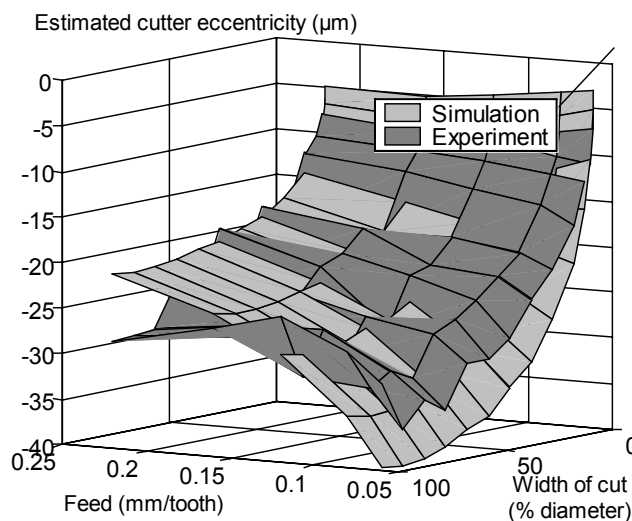


Figure 139. Comparaison du battement radial de la dent 2, estimé à partir de signaux expérimentaux et simulés. (série d'essais C, outil à 2 dents, [Rit06c])

Notre critère de SUI est basé sur un modèle d'effort affine. Cependant, nous avons vu à la fin du chapitre précédent que les estimations de battement radial qu'il permet d'effectuer, ne restent pas identiques lorsque les conditions de coupe varient. Le simulateur d'efforts que nous venons de développer à partir d'un modèle d'efforts non-linéaire, permet par contre de simuler correctement les efforts, en prenant en compte l'effet du battement radial des dents. Il est ainsi plus précis. Il va surtout nous permettre de prédire l'erreur sur l'estimation du battement radial faite par notre critère (Figure 139). Nous allons donc pouvoir compenser cette erreur (pendant l'usinage, grâce aux simulations numériques effectuées au préalable). C'est là un résultat important pour notre méthode de SUI.

3. Fonctions coûts de l'optimisation

Nous venons de voir que les écarts entre expérimentations et simulations sur les estimations du battement radial, sont plus grands lorsque l'avance varie. Or, notre objectif est d'estimer l'état de l'outil avec robustesse, et non de prédire au Newton près l'amplitude d'un pic d'effort. Par conséquent, la fonction coût des boucles d'optimisation de la phase d'étalonnage W_a (proposée à l'équation 42) n'est pas nécessairement la plus pertinente, dans notre cas. Les estimations de battement radial sont obtenues à partir des écarts entre les valeurs des entités F_j . Il serait donc intéressant que cela soit pris en compte dans la fonction coût. D'où

$$W_b = \sum_{i,j} (\Delta F_j - \Delta \hat{F}_j)^2 \text{ où } \Delta F_j = F_j - F_{j-1} \quad 57$$

Mais cette fonction coût donne un résultant trop éloigné de la réalité physique (efforts simulés 4 fois plus important que dans la réalité, Figure 140).

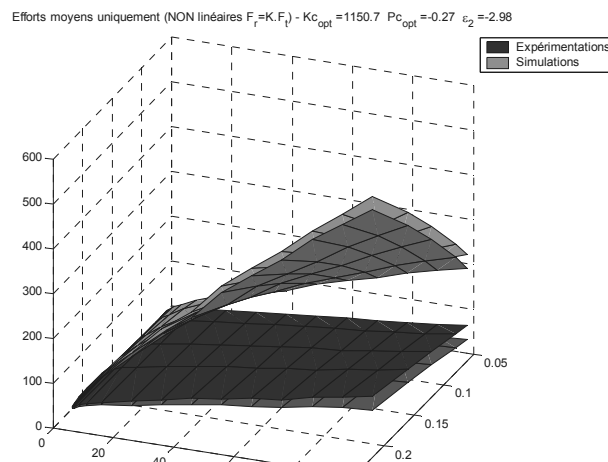


Figure 140. Comparaison des F_j , entre signaux expérimentaux et signaux simulés ; lorsque l'optimisation de l'étalonnage utilise la fonction coût W_b (équation 43).

La seule fonction coût W_b sera donc écartée. Néanmoins, un compromis entre les fonctions coût W_a et W_b semble souhaitable. D'où la proposition de la fonction coût suivante :

$$W_\lambda = \sum_{i,j} (F_{ji} - \hat{F}_{ji})^2 + \lambda \cdot \sum_{i,j} (\Delta F_{ji} - \Delta \hat{F}_{ji})^2 = W_a + \lambda \cdot W_b \quad 58$$

La variable d'ajustement λ permet d'effectuer ce compromis entre les 2 fonctions coût. Il sera réglé dans la dernière partie du chapitre IV. D'ici là, il est fixé à 0.

Nous venons ainsi de développer notre simulateur d'efforts de coupe et de vérifier qu'il donne des résultats satisfaisants. Il nous sera un outil essentiel afin de perfectionner notre méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente.

4. Conditionnement et traitement des signaux

L'attention portée au conditionnement des signaux devrait également permettre de réduire les variations des estimations de l'état de l'outil (bloc *B1* des diagrammes). Nous allons tout d'abord voir s'il est possible d'agir avant l'usinage, puis pendant l'usinage et enfin lors du traitement des données. Afin d'automatiser la méthode, nous allons générer, à partir des signaux d'efforts de coupe, des informations de plus haut niveau afin de connaître quand est ce que l'outil usine, que la coupe est stable et afin de détecter avec précision le passage des dents de l'outil (et même remonter jusqu'à la position angulaire instantanée de l'outil).

4.1. Intervention en amont du process

D'après Lapujoulade [Lap03], une part importante des vibrations provient de la table dynamométrique, lorsque celle-ci est sollicitée à des fréquences de passage des dents élevées. Il est donc tentant de sonner la table dynamométrique, ainsi que l'outil en broche ; puis d'analyser leurs réponses en fréquence (FRF) afin de choisir une fréquence de passage des dents évitant les principaux modes de vibration. La Figure 141 montre qu'il serait difficile de choisir une fréquence de passage des dents pour laquelle la composante fondamentale ainsi que ses harmoniques ne soient pas proches d'une fréquence modale. Par exemple, si l'on souhaite placer $2.f_c$ à 1 700 Hz pour éviter certains modes de vibration de la table (à gauche), le principal mode de résonance de l'outil va être sollicité (à droite).

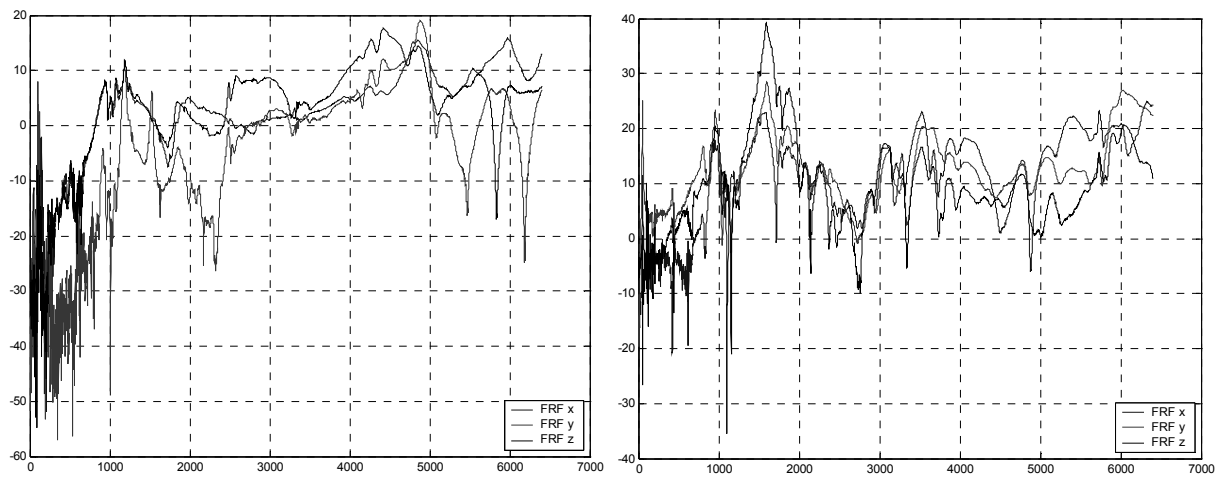


Figure 141. Réponses en fréquence (FRF, en Hz) résultant du sonnage de la table dynamométrique (à gauche) et de l'outil à 2 dents monté en broche (à droite), lors de la série d'essais B.

Ceci permet surtout d'aborder un point essentiel qui est que le système de Surveillance d'Usinage ne doit pas interférer avec le process. Le process de fabrication a été défini en amont, en fonctions de besoins bien précis. Le système de Surveillance d'Usinage n'est là que pour s'assurer du bon déroulement du process et, pour cela, il doit s'adapter au process. En effet, ce n'est pas au process de s'adapter, au risque de perdre en productivité ou en qualité. Par conséquent, toute intervention en amont du process (lors de sa conception par exemple) est à exclure.

4.2. Echantillonnage

Nous avons vu précédemment qu'afin de détecter un endommagement de plaquette avec fiabilité, une information sur le process relativement riche est nécessaire. En effet, elle doit traduire le travail effectué par chacune des dents, de sorte à pouvoir détecter la dégradation de l'une d'entre-elles. Il convient tout d'abord de s'assurer que la bande passante du capteur choisi permet de fournir cette information. Ensuite, plusieurs valeurs doivent être mesurées à chaque passage de dent, lors de l'usinage. Ceci doit rester vrai quelles que soient les conditions de coupe. Le cas le plus défavorable correspond aux passes où l'engagement radial est très faible. Les dents n'enlèvent alors de la matière que pendant un laps de temps très court et suffisamment de points par tour de broche doivent être mesurés pour que l'événement soit observable (au travers des signaux). Lors de nos essais, nous avons échantillonné de façon à obtenir au minimum une centaine de points par tour de broche. Une fois la vitesse de rotation de la broche

déterminée, la fréquence d'échantillonnage peut alors être calculée. Ceci a permis d'apprécier le travail de chacune des dents quelles que soient les conditions de coupe (V_c, f_z, a_e).

4.3. Filtrage

Tout d'abord, l'amplificateur possède un filtre passe analogique coupant à 180 kHz pour supprimer un repliement de spectre dans les mesures. Ensuite, au 1.4.2 du chapitre II et au 5.3.1 du chapitre III, nous avons vu qu'il est nécessaire de filtrer les signaux d'efforts mesurés en X et en Y avant de calculer la résultante des efforts de coupe, les mesures étant perturbées par des vibrations. Pour cela, un filtre passe-bas numérique de type Butterworth, sans retard de phase, est appliqué. En effet, ce type de filtre possède un gain aussi constant que possible dans sa bande passante. Un filtre du 5^e ordre a été choisi afin d'avoir à la fois une bonne qualité de filtrage et une marge de phase permettant de filtrer à des fréquences de coupure relativement basses par rapport à la fréquence d'échantillonnage. Après la fréquence de coupure, la réponse du filtre décroît donc de -100 dB/décade.

Le paramètre qui doit être réglé avec le plus de soin, est la fréquence de coupure du filtre. Si elle est trop élevée, trop de vibrations vont perturber les signaux et les estimations de l'état de l'outil ne seront pas robustes. A l'inverse, si elle est trop basse, des informations essentielles à l'estimation de l'état de l'outil peuvent être perdues. Nous utiliserons donc les indicateurs de qualité définis au 2^e paragraphe afin de déterminer à quelle fréquence filtrer nos signaux.

4.4. Ajustage des mesures

Il convient de recalibrer à zéro les mesures d'efforts lorsque l'outil n'usine pas. Cet écart est généralement supposé constant et il est compensé en début d'usinage. Lors de nos essais, l'usinage durait quelques minutes et une dérive de ces valeurs d'efforts à vide a été observée, engendrant des variations de la résultante des efforts de coupe pouvant atteindre une dizaine de Newtons. Cette dérive s'explique classiquement sur ce type de dynamomètre par les effets thermiques qui modifient les caractéristiques des piezzos (l'augmentation de température du porte-pièce situé entre la pièce et la table dynamométrique était palpable à la fin de l'usinage des derniers niveaux de la pièce).

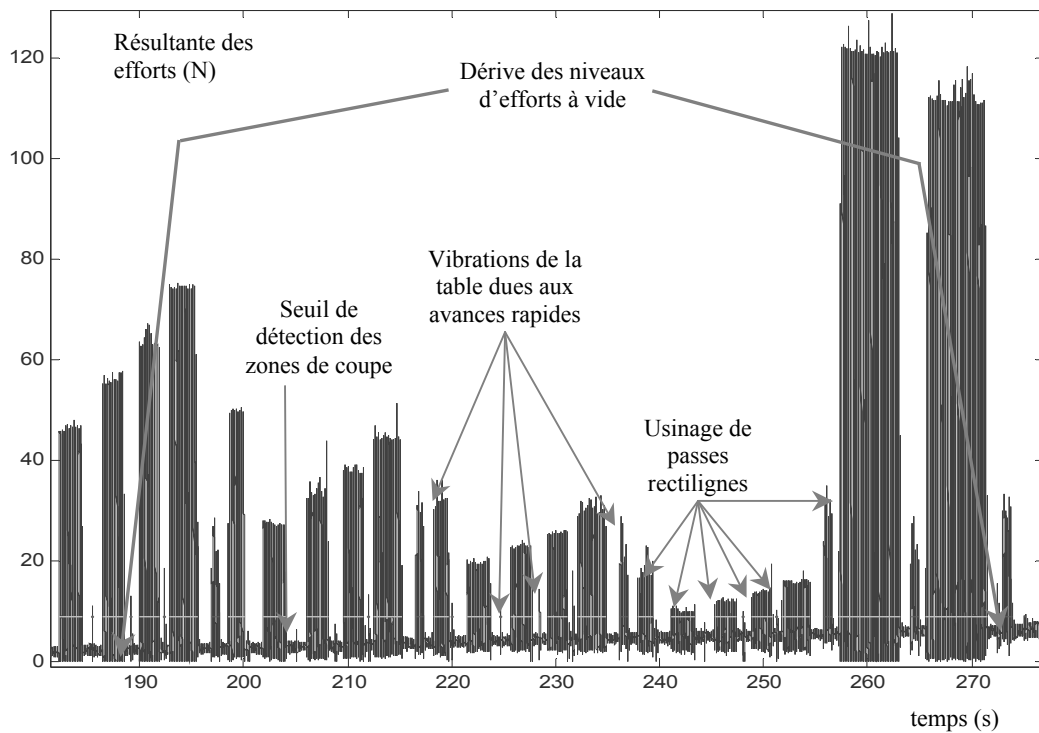


Figure 142. Résultante des efforts de coupe lors de l'usinage de 21 passes rectilignes et observation d'une dérive des niveaux d'efforts à vide pour une acquisition sur environ 5 min.

Afin de compenser cette dérive, il faut tout d'abord savoir quand l'outil n'usine pas. Pour cela, un seuil empirique est ici placé à 8 N. Sur chaque zone où les efforts sont inférieurs à ce seuil, le niveau des efforts à vide est calculé sur chacune des voies (Figure 143). Les niveaux d'efforts en X et en Y des zones de coupe sont alors réajustés linéairement en fonction des niveaux d'efforts à vide antérieurs et postérieurs. L'effet de la dérive est ainsi supprimé de la résultante des efforts de coupe. Ainsi, cela améliore la qualité des comparaisons de l'estimation de l'état de l'outil pour les nombreux jeux de conditions de coupe testés.

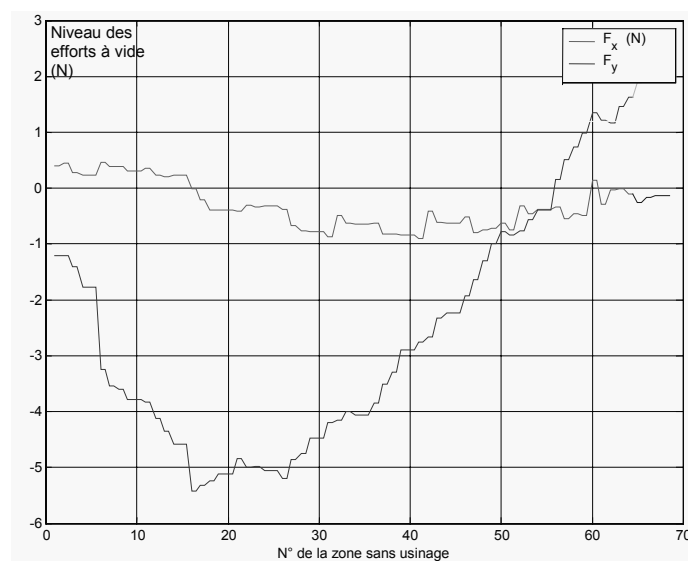


Figure 143. Dérive des efforts en X et Y (pendant 5 min environ) devant être compensée.

4.5. Détection des zones d'usinage

La méthode de Surveillance d'Usinage Intermittente compare l'état de l'outil sur les zones où la coupe est stable. Il convient donc de connaître tout d'abord quand est ce que l'outil usine. C'est sur ces zones qu'une entité caractéristique sera extraite des signaux afin d'estimer l'état de l'outil. En effet, cela n'a pas de sens de tenter d'extraire un pic d'effort lorsque l'outil n'usine pas. Il faut donc générer l'information « l'outil usine ».

Le seuil de détection des zones de coupe évoqué au paragraphe précédent est utilisé à cet effet. Néanmoins, comme on peut le voir sur la Figure 142, des niveaux d'efforts importants sont mesurés lors des mouvements en avance rapide. En effet, la table du centre d'usinage Cincinnati est mobile. Ainsi, la table dynamométrique, qui est montée dessus, vibre lors des déplacements en avance rapide. Il faut donc détecter ces zones pour les exclure du traitement des données. Pour cela, une FFT est calculée sur chaque zone où la résultante des efforts est supérieure au seuil de détection. Il a en effet été remarqué que la composante principale des efforts mesurés lors de déplacements en avance rapide, est à 50 Hz. Elle est probablement due à la tension qui alimente les moteurs des axes de la machine. Cette propriété va nous permettre de ne retenir des signaux que les zones où l'outil usine réellement. C'est sur ces zones que la surveillance d'usinage sera ensuite effectuée, lorsque la coupe est stable (cette notion est approfondie dans le prochain chapitre). Sur la Figure 142, le seuil de détection est de couleur claire lorsque l'outil usine et plus foncé lorsque qu'il s'agit de mouvement en avance rapide. En outre, cette détection des zones de coupe permet d'automatiser le dépouillement des mesures.

4.6. Détection des zones de coupe stable

La coupe est alors considérée « stable » si les conditions de coupe ne varient pas (actuellement, cette notion de stabilité ne prend pas encore en compte le broutement). Pour détecter cette stabilité, les valeurs moyennes des efforts sur un tour de broche sont suivies.

Une fenêtre glissante est utilisée : si l'étendue des variations des valeurs moyennes des efforts n'excède pas 8 N sur 10 tours de broche, par exemple, la coupe est considérée comme étant stable. Les zones de coupe stable sont situées entre les triangles gris sur la Figure 144.

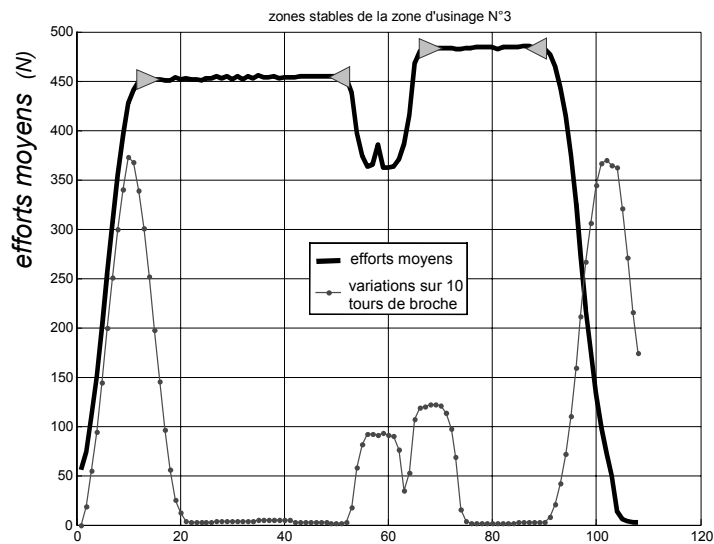


Figure 144. Détection des zones de coupe stable.

Ce n'est que lorsque la coupe est stable que le système de SUI établit un diagnostic quant à l'état de l'outil.

4.7. Détection du passage d'une dent

Ce paragraphe traite de la façon dont les entités caractéristiques (pics d'efforts ou autre) sont extraites à chaque passage de dent (blocs A3 et B3 des diagrammes).

4.7.1. De proche en proche

Une entité caractéristique (telle que les pics d'effort) est extraite à chaque passage de dent afin d'estimer l'état de l'outil. Il convient donc de connaître précisément quand chaque dent est en train d'usiner, pour extraire le pic d'effort qu'elle génère par exemple. La méthode présentée au chapitre II n'est pas suffisamment robuste, notamment lorsque l'outil comporte plus de 3 dents. Les pics d'efforts y sont recherchés de proche en proche, en avançant l'intervalle de recherche d'une période de passage des dents par rapport au pic précédent. Le léger retard d'un pic à cause du bruit, engendre un déphasage aléatoire qui peut faire diverger l'algorithme de recherche des pics à tout moment. La Figure 145 illustre ce déphasage aléatoire, notamment après le pic de la 3^e dent (en couleur claire). Néanmoins, cet algorithme permet d'extraire les pics d'efforts sans aucune connaissance a priori des conditions de coupe et avec une valeur approchée de la fréquence de passage des dents. Il permet surtout de s'affranchir des changements de direction de l'outil et ainsi de continuer à rechercher les pics d'efforts malgré le franchissement de virage. C'est pourquoi il avait été retenu pour traiter notre pièce test du chapitre II. Nous allons maintenant rendre cet algorithme plus robuste en faisant des hypothèses.

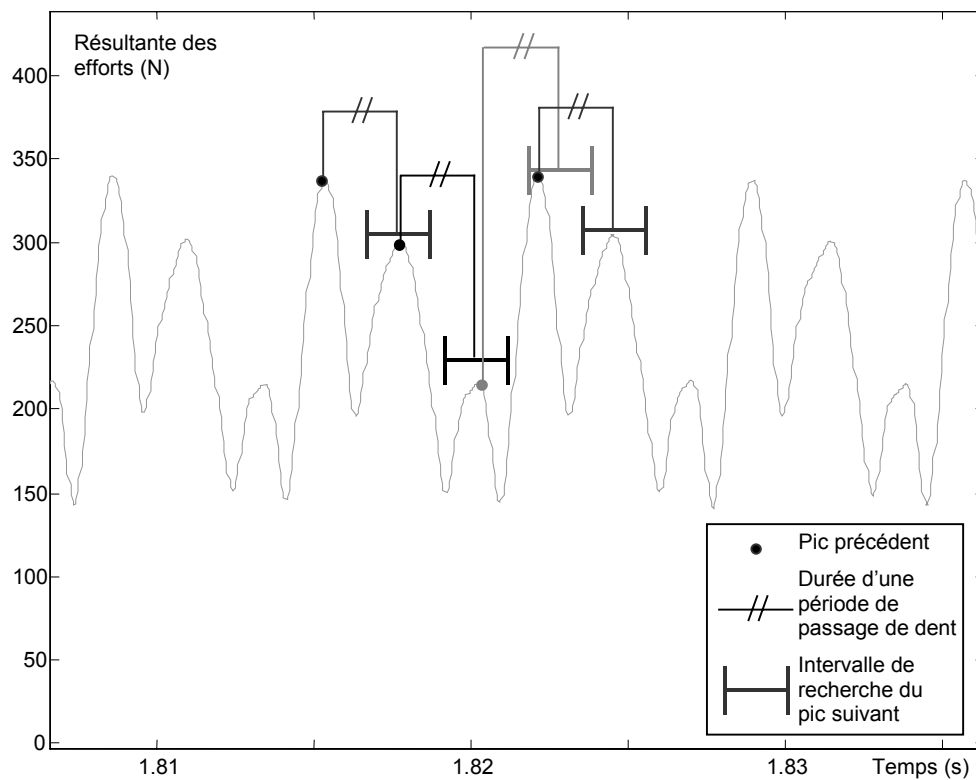


Figure 145. Extraction des pics d'effort de proche en proche (outil à 3 dents, $f_z=0,2$ mm/dent, $a_e=100\%$).

Pour savoir quand rechercher un pic d'effort, l'idéal est de connaître la position angulaire instantanée de la broche. Cette information peut être obtenue à partir des mesures du codeur de broche ou en faisant des hypothèses quant à la qualité de l'asservissement de la broche (ne disposant pas des mesures de codeur, nous privilégierons cette 2nde voie). Nous distinguerons donc le cas où nous disposons d'une information similaire au codeur de broche, ou pas.

4.7.2. A période constante

Nous allons supposer que l'asservissement en vitesse de la broche est parfait lorsque le chargement de la broche est constant, c'est-à-dire lorsque les conditions de coupe sont stables. Cette hypothèse autorise un déphasage de la position angulaire de la broche lors des phases d'entrée et de sortie matière, par exemple. C'est ce qui a été observé sur la Cincinnati, où des retards de 30 à plus de 360° étaient généralement constatés lors de ces phases. Cette méthode s'adresse donc principalement aux séries d'essais A et B.

Si cette hypothèse est vérifiée, on sait directement quand chaque dent usine, au cours d'une même passe (Figure 146). Les intervalles de recherche des pics d'efforts sont placés à chaque période de passage de dent T_c . Ainsi, la part aléatoire de l'algorithme de recherche de proche en proche est supprimée.

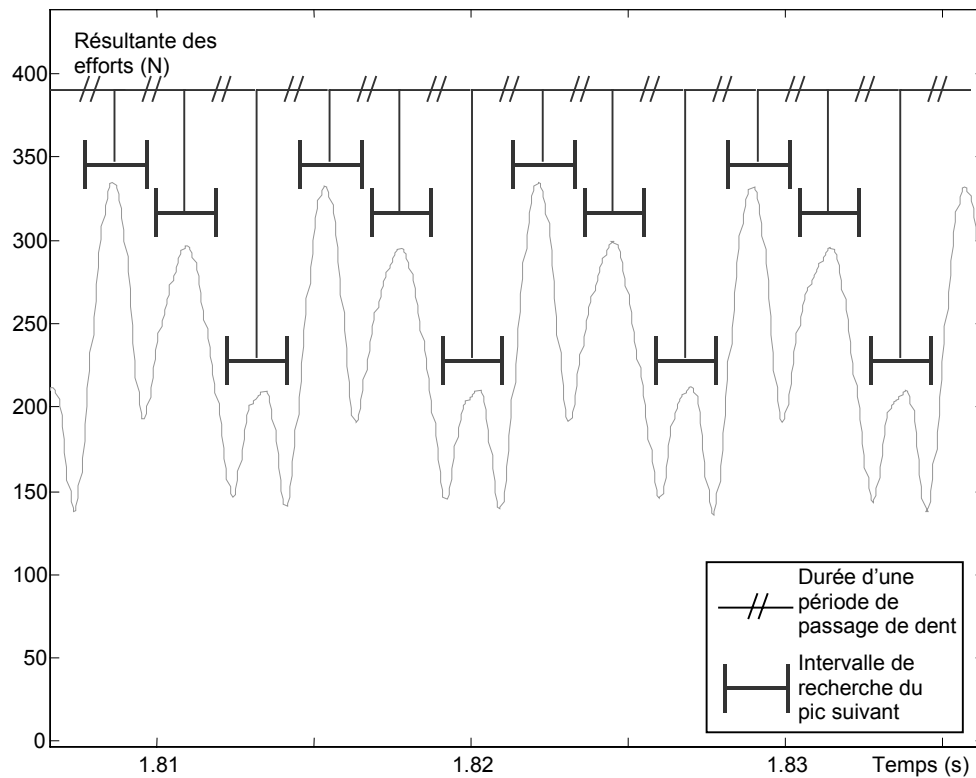


Figure 146. Extraction des pics d'effort à période constante.

Un recalage (temporel) de l'ensemble des intervalles de recherche est nécessaire au début de chaque passe (une fois que la coupe est stable). Il est effectué à partir de la position du pic d'effort le plus élevé. Lors de cette opération de recalage, le pic en question est extrait d'une résultante qui a été calculée après filtrage des efforts de coupe à 1 fois la fréquence de passage des dents (au lieu de 2 fois) pour plus de robustesse. L'intervalle de recherche de ce pic est placé en fonction de la position du pic lors de la passe précédente et d'une connaissance a priori de la direction d'usinage et de l'engagement radial de chaque passe.

En effet, notre hypothèse suppose que les pics d'efforts générés par une même dent sont distants d'une période de rotation de la broche, soit $Z \cdot T_c$ (au bruit près). Mais si l'outil change de direction, le pic aura lieu à un instant différent, comme l'illustre la Figure 147. De même, le pic aura lieu à un instant différent en fonction de l'engagement radial de l'outil ainsi que s'il usine en avalant ou en opposition. Il faut donc prendre en compte la direction d'avance ainsi que le type d'engagement de l'outil afin d'éviter que l'algorithme ne diverge entre deux passes différentes (comme cela peut être le cas si, pour un outil à 3 dents, 2 des dents génèrent des pics d'amplitude plus élevée et de même grandeur).

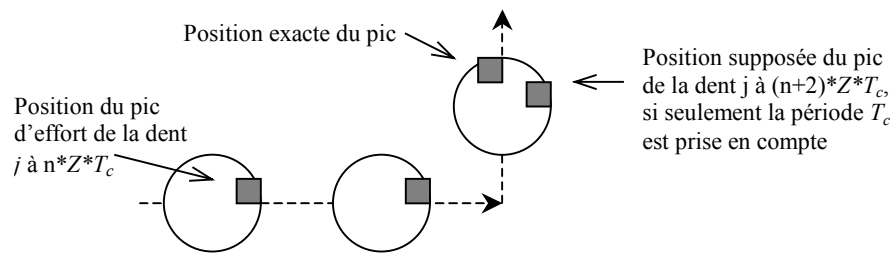


Figure 147. Déphasage des pics d'efforts dû à la direction d'avance.

Pour éviter toute divergence, il est également nécessaire de connaître avec précision la fréquence réelle du passage des dents. Pour cela, une FFT est effectuée pour chacune des passes. La composante située à la fréquence de passage des dents f_c , est alors identifiée. L'harmonique située à $3f_c$ est alors recherchée et permet d'estimer f_c avec une plus grande précision. Enfin, une moyenne de ces estimations est calculée à partir de l'ensemble des passes (70 au minimum).

Cette méthode nécessite une connaissance a priori de la direction d'avance et du type d'engagement radial mais une identification précise de la fréquence réelle de passage des dents permet ainsi de connaître quand une dent usine avec davantage de robustesse.

4.7.3. A partir de la position angulaire de la broche

La méthode d'extraction d'entités à période constante (paragraphe précédent), présente une limite lorsque plusieurs dents sont engagées simultanément dans la matière (outils à plus de 3 dents). Une erreur peut survenir lors du recalage temporel effectué en début de passe. En outre, du fait du chevauchement du travail des dents, le pic généré pendant le passage d'une dent ne reflète pas uniquement le travail de celle-ci.

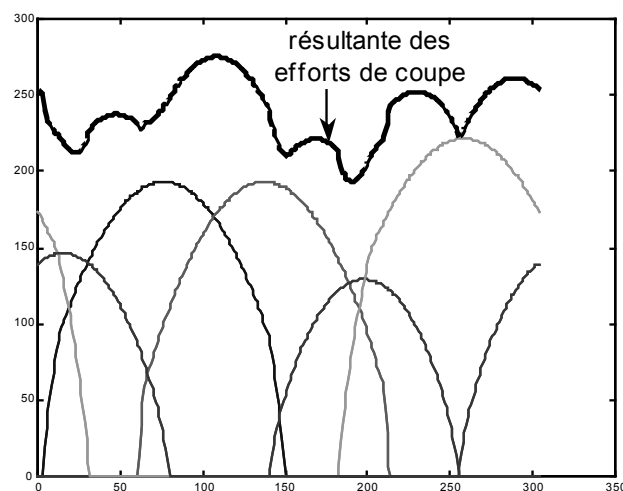


Figure 148. Efforts simulés pour un rainurage avec outil à 5 dents.

Il ne suffit plus de connaître un intervalle où la dent travaille (comme avec la méthode ci-dessus). Il faut connaître précisément les positions angulaires où elle travaille afin de pouvoir extraire une entité plus pertinente, vis-à-vis du seul travail effectué par cette dent. Afin de pouvoir déterminer les instants d'entrée et de sortie de la matière de chaque dent, outre les conditions de coupe, il faut connaître la position angulaire de la broche.

Ne possédant pas les mesures du codeur de broche, au moment où les essais ont été réalisés, nous allons générer cette information à partir des signaux d'efforts. Pour cela, nous admettrons l'hypothèse que l'asservissement en vitesse et en position de la broche est parfait, c'est-à-dire qu'elle ne prendra aucun retard lors des phases d'entrée en matière par exemple. Ceci a été constaté sur le Hermle. Cette méthode s'appliquera donc exclusivement sur la série d'essais C.

Au paragraphe précédent, il est expliqué comment calculer avec précision la fréquence réelle de passage des dents. Il est alors possible de considérer les efforts de coupe tour de broche après tour de broche. Après quelques minutes d'usinage, une très faible erreur sur l'estimation de f_c va engendrer un déphasage entre les tours de broche du début de l'usinage et ceux de la fin. Sur la Figure 149, la position angulaire de référence est l'entrée en matière de la dent qui usine le plus. On observe ici le déphasage rencontré en fin d'usinage. Il est alors quantifié et permet d'affiner la valeur de f_c . Pour cela, l'entrée en matière (pour une passe en opposition) est détectée à partir du pic de la dérivée seconde de la résultante des efforts de coupe. Lors de l'application du système de Surveillance d'Usinage Intermittente à des cas industriels, le calcul de f_c sera effectué à partir des passes d'étalonnage.

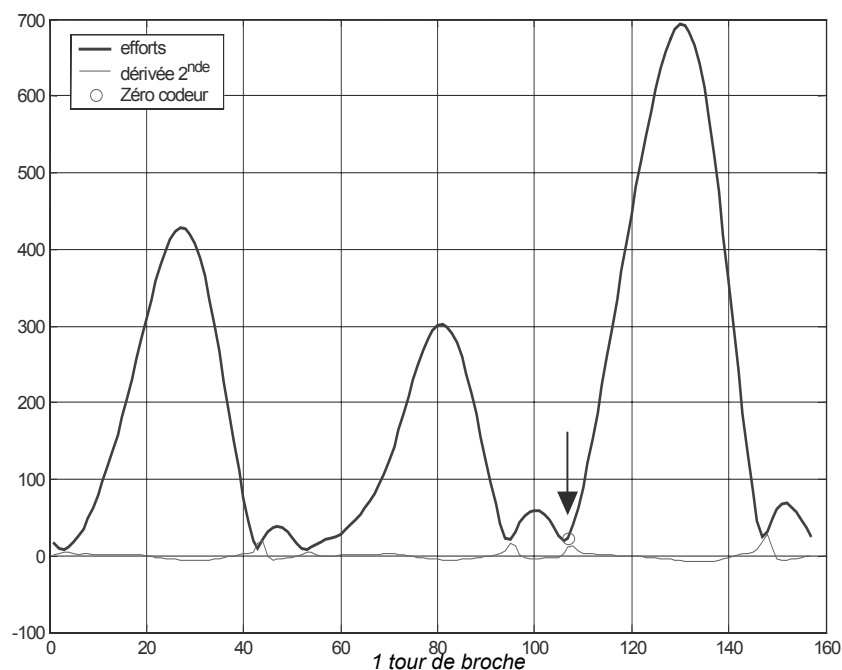


Figure 149. Affinage de l'estimation de la fréquence de passage des dents.

Cette valeur affinée de la fréquence réelle de passage des dents permet alors de ré-interpoler les mesures pour qu'elles soient synchrones avec les tours de broche. Les zones où l'outil usine sont alors détectées à partir des valeurs moyennes des efforts par tour de broche. Connaissant a priori les trajectoires de l'outil, les déphasages des efforts dus aux changements de direction d'avance sont compensés.

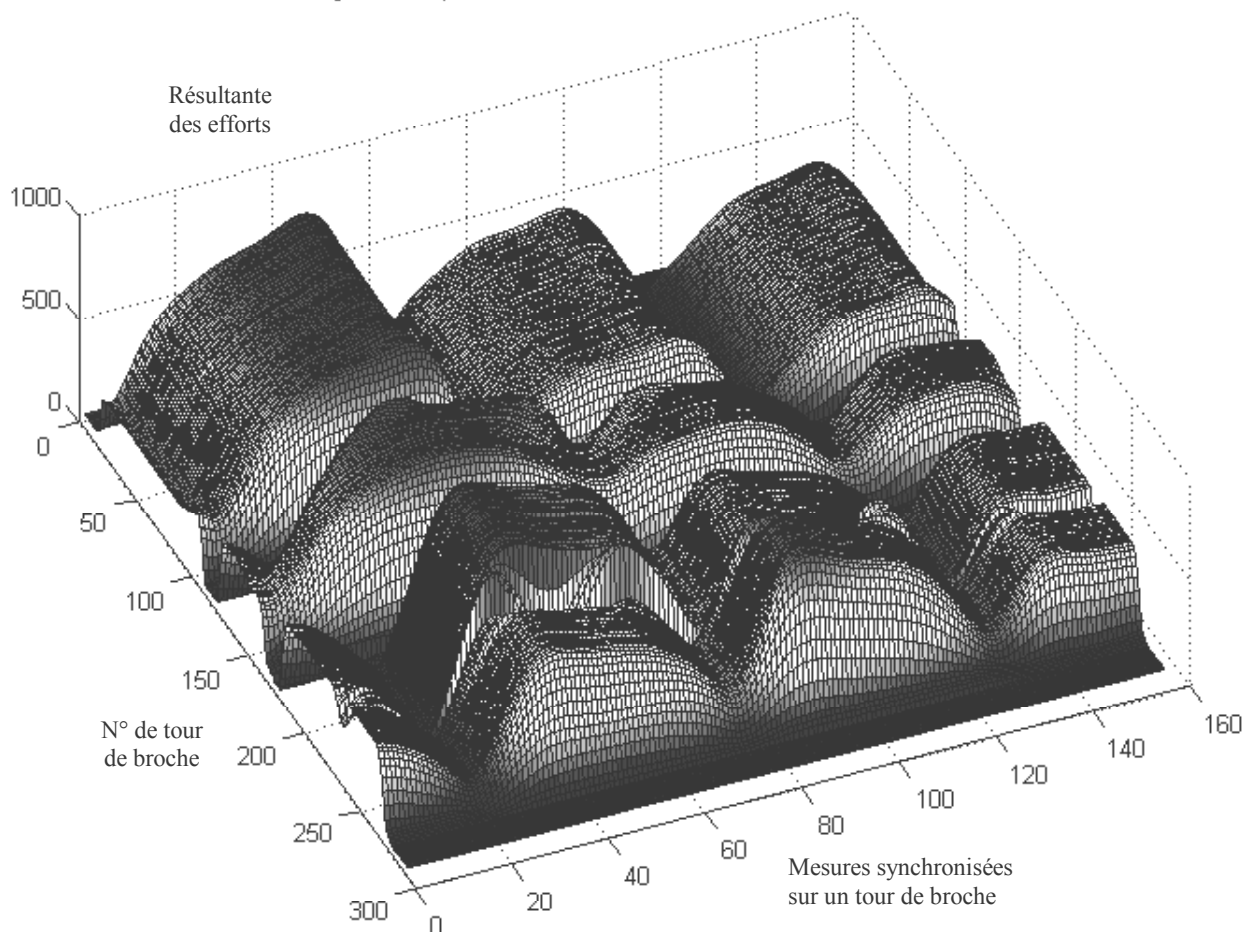


Figure 150. Evolution des efforts tour de broche après tour de broche, après correction de la direction d'avance.

Cela permet alors de connaître à chaque instant quelle dent est en train d'usiner et ainsi d'extraire avec robustesse la partie des signaux qui semble la plus pertinente pour estimer l'état de l'outil.

Annexes du chapitre V : Déroulement de l'écaillage de la dent N°3.

Le chapitre V présente comment le léger écaillage de la dent N°3 est détecté par notre système *SUIMO*. Nous allons ici voir le déroulement de l'incident, tour de broche après tour de broche. Nous allons étudier la signature d'effort de chaque tour de broche usinant à proximité du trou où l'insert a été placé. Sur chaque graphe, les efforts générés pendant un nouveau tour de broche sont tracés en noir. Les efforts générés aux tours de broche précédents sont représentés en arrière plan, de différentes couleurs.

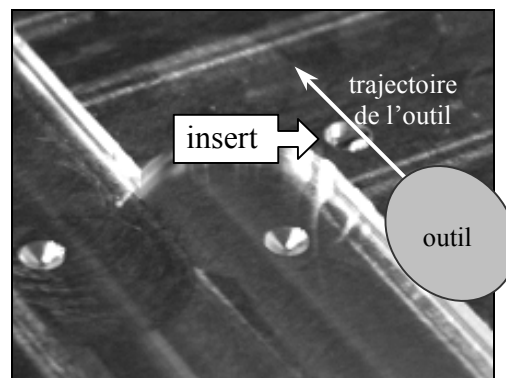


Figure 151. Configuration de l'usinage.

Avant le trou, la passe est rectiligne et la coupe est stable (tours N°50 à 52). On reconnaît les 3 bosses correspondant au passage de chacune des 3 dents, en avalant ici.

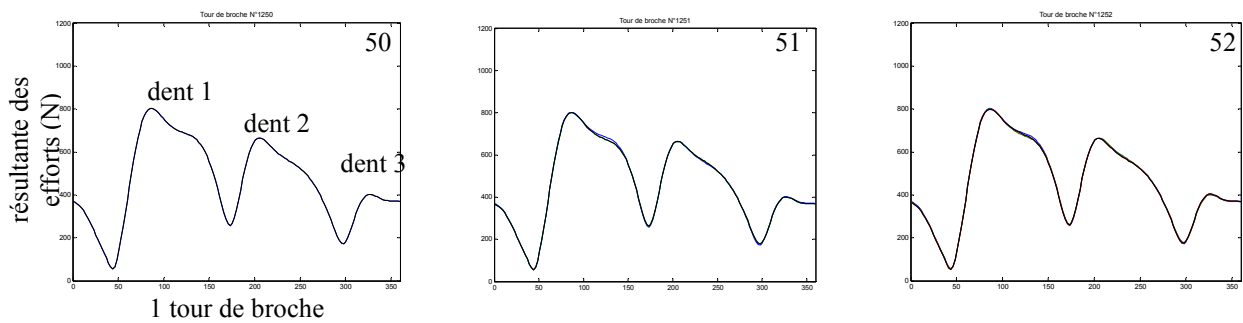


Figure 152. Passe rectiligne et stable avant le trou.

Le début de l'usinage du trou est constaté au passage de la dent 2 au tour N°53. En effet, un creux apparaît car la dent ne peut enlever de la matière qu'à gauche et à droite du trou et les efforts chutent au passage de celui-ci. Aux tours 54, 55 et 56, ces creux sont de plus en plus profonds.

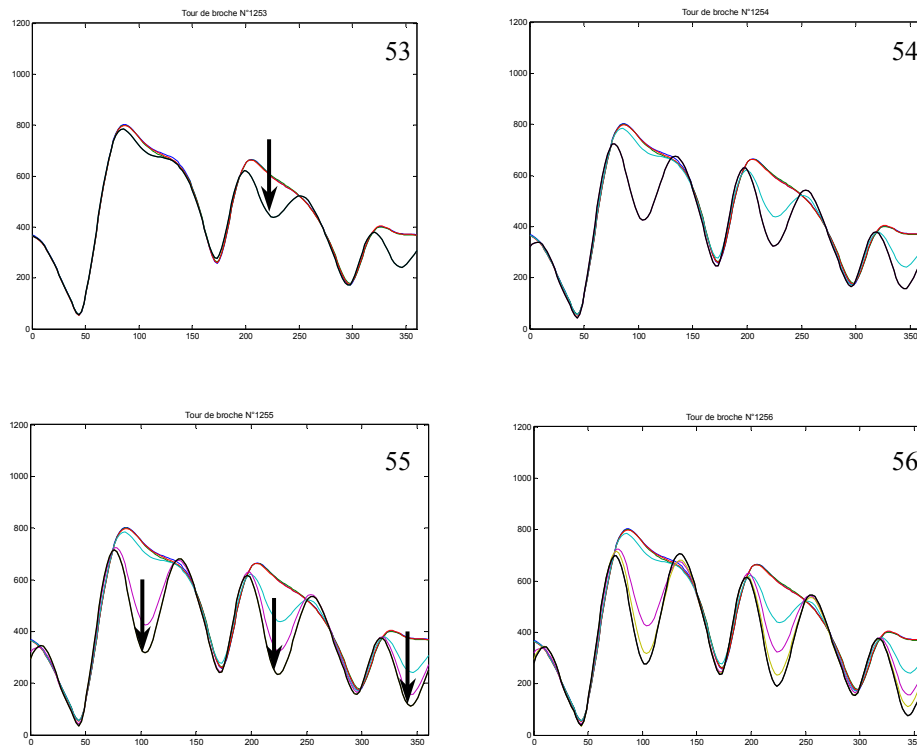


Figure 153. Première moitié du franchissement du trou.

Au tour N°57, les efforts sont plus importants qu'au tour précédent au passage du creux, pour les dents 2 et 3. Il s'agit probablement du début de l'usinage de l'insert, ou du moins les dents le frôlent.

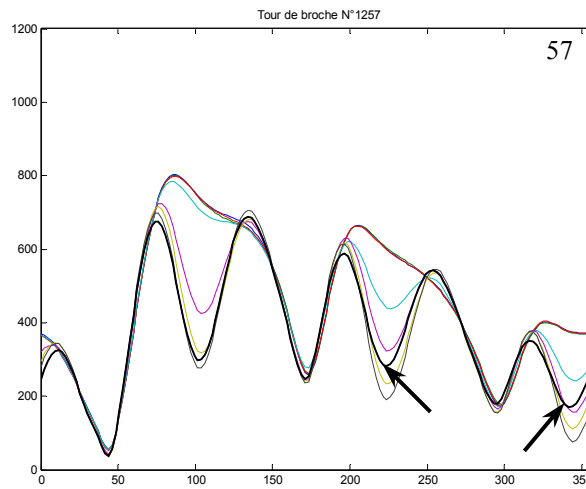


Figure 154. L'insert ?

Au tour N°58, sur la 2nde partie du passage de la dent 2 et sur le début du passage de la dent 3, les efforts sont plus importants qu'à la normale (flèches noires). Ceci doit correspondre à l'usinage de l'insert. Par contre, les efforts sont étonnamment plus faibles au creux de la dent 3 (flèche grise). Un incident ne se serait-il pas produit entre les deux ?

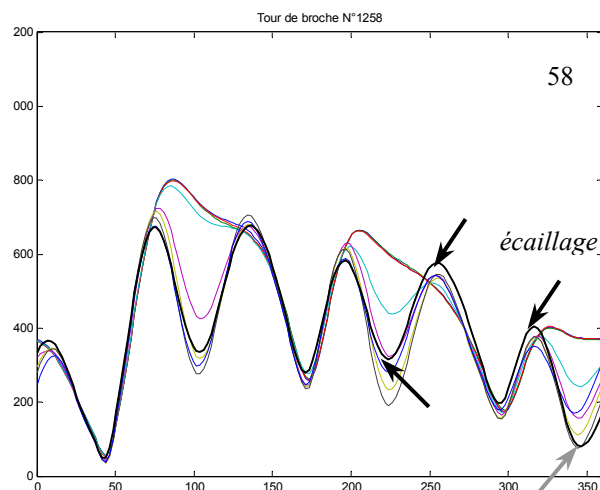


Figure 155. L'insert.

Au début du tour 59, nous voyons la 2nde partie du passage de la dent 3 (du tour précédent). Les niveaux d'efforts sont inférieurs (*a* flèche grise). Ce qui signifie que la dent enlève moins de matière et qu'elle est légèrement endommagée. La 2nde partie du passage de la dent 1 confirme cette impression car les efforts sont là plus importants à cause de la charge supplémentaire sur la dent (*b*). De plus, les efforts générés par la dent 3 (fin du tour présent) sont plus faibles (*c*). Par contre, comme la dent 3 n'était pas endommagée (au tour précédent) sur la 1^{ère} partie de son passage, les efforts de la dent 1 sur cette partie sont du même ordre qu'au tour précédent (*d*). La dent 3 a donc bien été endommagée à la fin du tour de broche N° 58. En outre, on peut constater que les creux formés au passage de chaque dent sont plus prononcés. Cela signifie probablement que l'insert a été évacué (*e*).

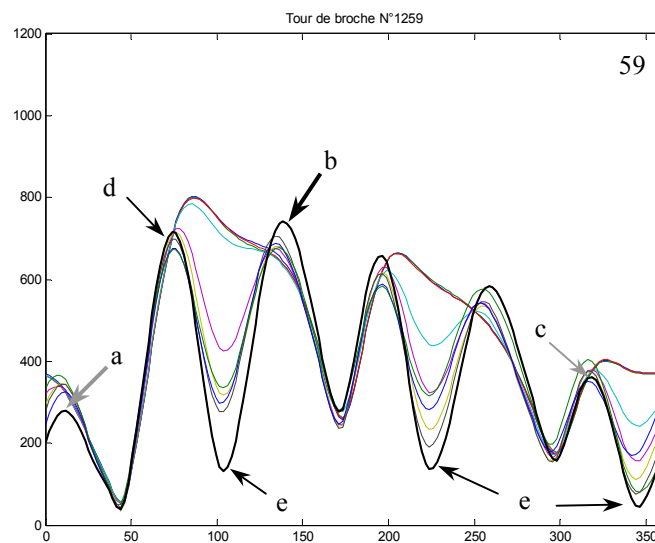


Figure 156. Constatation de l'écaillage.

Au tour N°60 et 61, nous avons confirmation que la dent 1 usinage davantage qu'avant.

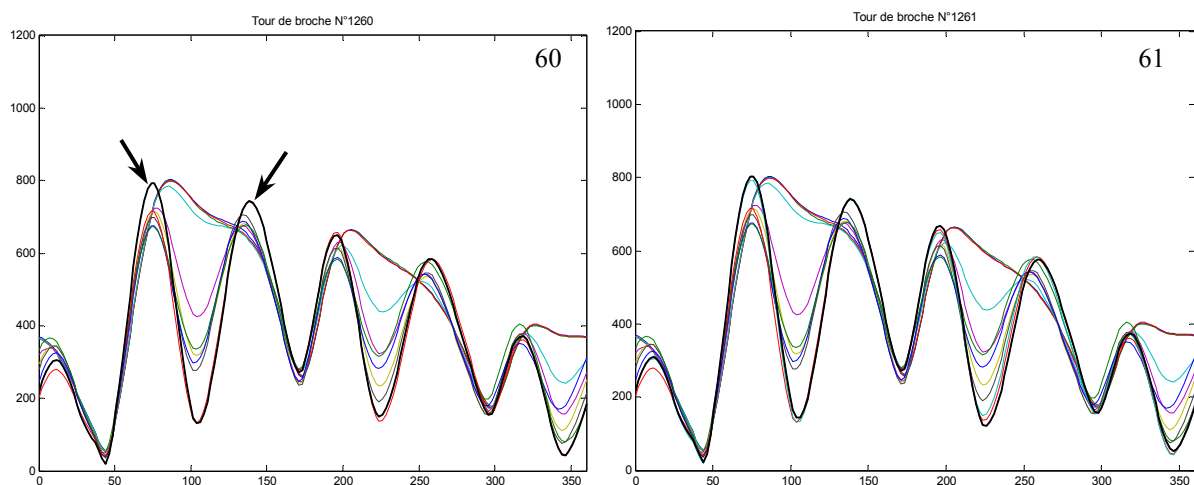


Figure 157. Confirmation de l'écaillage.

Entre les tours N°62 et 65, les creux au milieu du passage des dents se résorbent. Cela signifie que l'outil est en train d'usiner sur la 2nde moitié du trou.

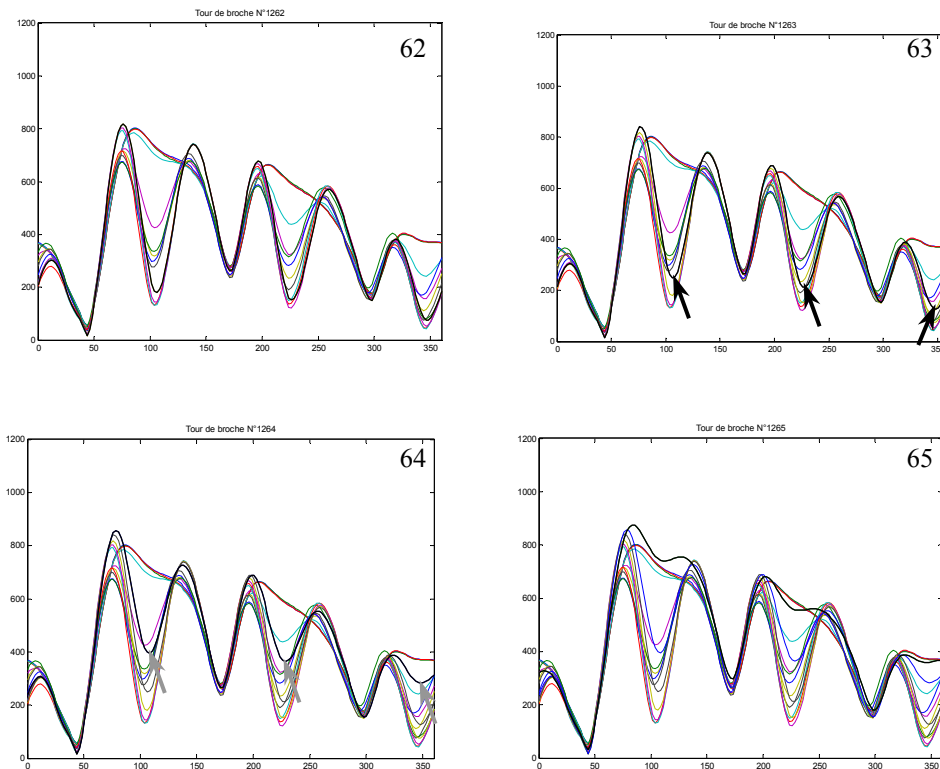


Figure 158. Seconde moitié du franchissement du trou.

A partir du tour N°66, la passe est à nouveau rectiligne et les conditions de coupe stables.

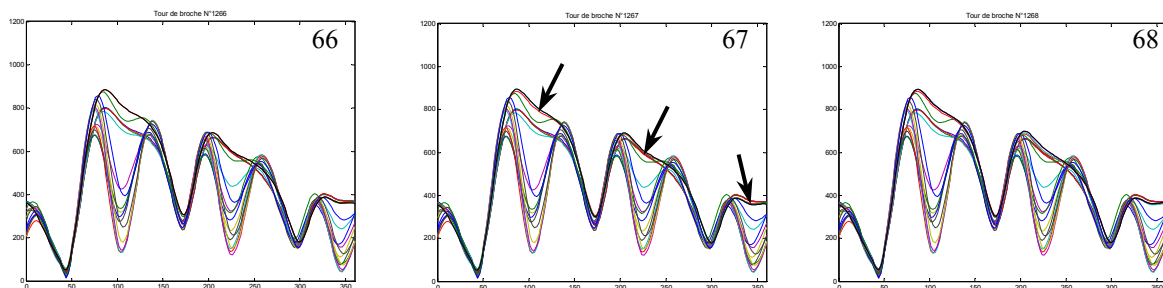


Figure 159. Passe rectiligne et stable, après le trou.

Conclusion : En cas de faible endommagement d'une dent de l'outil, nous n'avons donc pas la brusque augmentation du niveau des efforts à laquelle nous nous attendions. Le processus est beaucoup plus subtil. La dent cède à un instant donné, les efforts générés par la dent diminuent alors (fin du tour N°58) et c'est davantage la conséquence de l'incident qui va être détectée : la dent suivante doit enlever un surplus de matière. La méthode de surveillance d'usinage présentée dans ce manuscrit est donc particulièrement pertinente.

SURVEILLANCE D'USINAGE EN FRAISAGE DE PIÈCES COMPLEXES PAR UN SUIVI DE LA BROCHE

Résumer : Pour sécuriser le processus de fabrication, garantir la qualité des pièces et atteindre une pleine productivité, des Systèmes de Surveillance Automatiques de l'Usinage (SSAU) sont nécessaires. Cependant, si des solutions sont proposées pour la production de grandes séries, il n'existe pas actuellement de SSAU pour les systèmes de production flexible en fraisage (ces derniers fabriquant notamment les pièces complexes à forte valeur ajoutée). L'objectif des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit, est donc de répondre à ce besoin industriel en proposant une solution efficace et fiable de Surveillance Automatique de l'Usinage pour la production flexible par fraisage.

Tout d'abord, plusieurs critères issus de la bibliographie et susceptibles de résoudre notre problématique, ont été testés dans des conditions de coupe et de trajectoires industrielles, ce qui n'avait pas été fait auparavant. L'analyse de leur comportement a permis de mettre en évidence leurs faiblesses et de faire évoluer notre réflexion, avant de proposer une nouvelle méthode : la Surveillance d'Usinage Intermittente. L'état de l'outil est estimé à partir des efforts de coupe, puis reporté sur une carte de contrôle. Pour plus de fiabilité, seules les zones où la coupe est stable sont surveillées.

Afin d'augmenter la précision, la robustesse et le domaine de validité de la méthode, des améliorations ont ensuite été apportées, quant au conditionnement et à l'analyse des signaux d'efforts. Par ailleurs, les estimations de l'état de l'outil sont affinées pendant l'usinage, grâce à des simulations numériques effectuées au préalable. Des expérimentations ont validé l'approche, par des détections fiables de l'état d'un outil possédant 5 dents (dont une endommagée ou non).

Enfin, nous avons montré que notre méthode permet de détecter de très faibles endommagements de l'outil, survenant au cours de l'usinage d'une pièce. Nous proposons également de coupler notre SSAU à un système d'inspection des outils hors-usinage pour confirmer les détections. Nous avons ensuite montré que notre méthode n'est pas perturbée par l'usure des outils. Une table dynamométrique n'étant pas viable industriellement, nous avons cherché des alternatives. Nous avons finalement montré que la mesure d'efforts peut être réalisée en instrumentant la broche par des capteurs inductifs. L'application de notre méthode permet alors, dans un cadre industriel, de détecter de très faibles endommagements de l'outil, lors de production flexible en fraisage.

Mots-clés : Surveillance d'usinage, bris, usure, fraisage, production flexible, battement radial, modèle effort, capteur inductif, carte de contrôle.

SPINDLE INSTRUMENTATION FOR TOOL CONDITION MONITORING OF COMPLEX WORKPIECE MANUFACTURING IN MILLING

Abstract: In order to ensure manufacturing process safety, workpiece quality and full productivity, Tool Condition Monitoring (TCM) systems are needed. Whereas solutions are proposed for mass production, there is a lack of efficient and reliable solutions for flexible manufacturing in milling (the latter producing notably high added value and complex parts). The purpose of this work is to propose a reliable TCM solution for flexible manufacturing in milling.

Firstly, indicators retrieved from literature are implemented with industrial trajectories and cutting conditions. The analysis of their behaviour reveals their limits. Then, a new Versatile In-process tool condition Monitoring (VIM) system is suggested. To tackle the problem of reliability, monitoring is stopped during cutting transients. Tool state is estimated from cutting forces and plotted in a control chart.

In order to increase precision, robustness and field of application of our method, improvements are proposed. For example, in-process estimations of tool state are refined thanks to off-line numerical simulations. Experiments have validated the VIM approach, by reliable detections of the state of a 5 inserts tool (damaged or not), under a wide range of cutting conditions.

Lastly, we have shown that the method allows detecting cutter breakages such as very small chipping, occurring during workpiece machining. It is also proposed that the VIM system is coupled with an off-line Tool Inspection system (forming the VIMTI system), to confirm detections. The method is unaffected by tool wear. Since dynamometer table is incompatible with industrial productions, alternative sensor was search. It is shown that the VIM system applied to inductive sensors allows detecting very small cutter breakage during flexible manufacturing in milling and in industrial conditions.

Keywords: tool condition monitoring, breakage, wear, milling, flexible manufacturing, radial eccentricity, force model, inductive sensor, control chart.